



Porézní hliníkové systémy

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Petr Nastoupil

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Porézní hliníkové systémy

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Nastoupil**
Osobní číslo: **S18000229**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou kovových celulárních systémů (kovových pěn), zaměřte se též na porézní hliníkové systémy.
2. Na základě prostudované literatury se pokuste charakterizovat tyto systémy a jejich rozdělení. Zaměřte se hlavně na systémy, které se týkají především zpracování slitin hliníku.
3. Na základě prostudované literatury se pokuste vybrat jednu z technologií, která by se mohla aplikovat v našich podmínkách – Katedry strojírenské technologie TUL.
4. Pokuste se na základě čistého hliníku nebo nějaké slitiny hliníku vyrobit tento systém. Charakterizujte jeho vlastnosti.
5. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle úvahy
50 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ASHBY, M.F. et al. Metal Foams. A Design Guide. 1. ed. *Butterworth-Heinemann* 2000.
- [2] BANHART, J. Manufacturing Routes for Metallic Foams. *Solidification Science: Over view Journal JOM* 52 (12) 2000, pp. 22-27.
- [3] RAJAK, D.K. KUMARASWAMIDHAS, L.A. and S. DAS. Technical Overview of Aluminum Alloy Foam. *Advanced Material Science*. 48 (2017), pp. 68-86.
- [4] NOVÁ, I. a J. MACHUTA. Hliníkové pěny. *MM Průmyslové spektrum*, č. 12, 2007, s. 58.
- [5] BEDNÁŘOVÁ, V., LICHÝ, P., Lité porézní kovy – výroba a vlastnosti, *Slévárství LX*, leden – únor 2012, 1-2, s. 9.
- [6] OSORIO, J.O et al. Manufacturing of Open – Cell Mg Foams by Replication Process and Mechanical properties. *Materials and Design*, 64, 2014, pp. 136-141.
- [7] PAPATONIOU, I.G. et al. Application of Aluminium Flakes in Fabrication of Open-Cell Aluminium Foams by Space Holder Method. *Materials* 2018, 11(8), p. 1420.
- [8] BAKAN, H.I. A Novel Water Leaching and Sintering Process for Manufacturing Highly Porous Stainless Steel. *Scr. Mater.* 2006, 55, 203-206.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

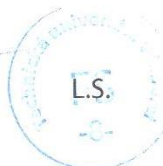
Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. června 2020

Bc. Petr Nastoupil

Abstrakt

Diplomová práce je řešena na téma „Porézní hliníkové systémy“. Je rozdělena do dvou částí – teoretické a experimentální. V teoretické části jsou shrnuty charakteristiky hliníku a lehčených kovových materiálů. Dále jsou zde popsány druhy technologie výroby lehčených kovových materiálů a následně podrobně popsána výroba porézních materiálů, která je založena na vyvození vakua ve „slévárenské“ formě a přívodu argonu do formy, na jejímž dně je chlorid sodný, na který se vkládá tableta hliníkového polotovaru. Experimentální část se zabývá výrobou porézních vzorků pomocí metody vyvinuté na Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci, lisováním odměřeného množství chloridu sodného do taveniny slitiny hliníku. Následuje výpočet a zkoušení vlastností těchto vyrobených vzorků.

Klíčová slova: slitina hliníku, porézní hliníkové materiály, chlorid sodný, uzavřené buňky, otevřené buňky.

Abstract

The diploma thesis is solved on the topic "Porous aluminium systems". It is divided into two parts - theoretical and experimental. The theoretical part summarizes the characteristics of aluminium and lightweight metal materials. Further, the types of technology for the production of lightweight metallic materials are described and the production of porous materials is described in detail, which is based on creating a vacuum in a "foundry" mould and supplying argon to a mould with sodium chloride at the bottom and an aluminium blank tablet. The experimental part deals with the production of porous samples using a method developed at the Department of Engineering Technology, FS - TU in Liberec, by pressing a measured amount of sodium chloride into an aluminium alloy melt. The following is a calculation and testing of the properties of these produced samples.

Key words: aluminium alloy, porous aluminium materials, sodium chloride, closed cells, open cells.

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval především vedoucí mé diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za odborné vedení, cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracování zvoleného tématu. Také bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu během celé doby studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část práce	13
2.1 Hliník a jeho slitiny	13
2.1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin	13
2.1.2 Slitiny hliníku	15
2.2 Charakteristika kovových pěn	18
2.3 Technologie výroby kovových pěn s uzavřenými buňkami	20
2.4 Technologie výroby kovových porézních materiálů s otevřenými buňkami	23
2.4.1 Výroba porézních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvárů NaCl	24
3 Experimentální část	32
3.1 Cíle experimentu	32
3.2 Charakteristika použitých materiálů	32
3.2.1 Charakteristika použitého chloridu sodného	32
3.2.2 Charakteristika slévárenské slitiny AlSi12	33
3.2.3 Výpočet množství soli a slitiny pro výrobu vzorků	34
3.3 Postup výroby vzorků	35
3.3.1 Natavení hliníku a ohřátí formy	36
3.3.2 Odlévání vzorků	36
3.3.3 Nalisování chloridu sodného do taveniny hliníku	36
3.3.4 Vyrobené vzorky	37
3.4 Geometrické a fyzikální vlastnosti vzorků	39
3.5 Vyhodnocení vlastností vyrobených vzorků	40
3.6 Sledování propojení dutin porézného materiálu	46
3.7 Sledování pevnosti v tlaku a Youngova modulu pružnosti	48

4 Diskuse výsledků.....	51
5 Závěr	53
Použitá literatura	55

Seznam použitých symbolů a zkratek

Al	[-]	hliník
Si	[-]	křemík
Cu	[-]	měď
Mg	[-]	hořčík
Zn	[-]	zinek
Ni	[-]	nikl
Mn	[-]	mangan
AlSi12	[-]	druh slitiny hliníku
α	[-]	tuhý roztok
T	[°C]	teplota
at.	[%]	procento prvku dle atomů
hm.	[%]	procento prvku dle hmotnosti
TiH ₂	[-]	hydrid titaničitý
NaCl	[-]	chlorid sodný
AlSi7Mg	[-]	druh slitiny hliníku
Fe	[-]	železo
Ti	[-]	titan
V	[-]	vanad
Na	[-]	sodík
Pb	[-]	olovo
V _f	[m ³]	objem vnitřku formy na vzorky
v	[mm]	výška vzorku
D	[mm]	větší průměr vzorku

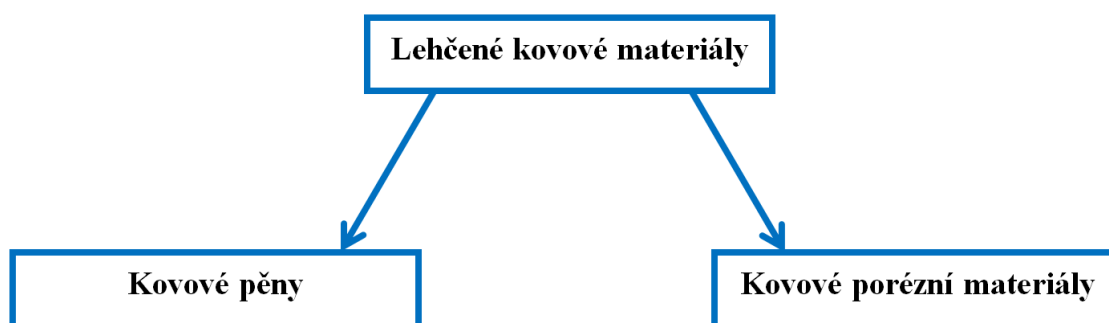
d	[mm]	menší průměr vzorku
V_{SLIT}	[m ³]	objem použité slitiny hliníku (AlSi12)
V_{NaCl}	[m ³]	objem použitého chloridu sodného
m	[kg]	hmotnost
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota
V	[m ³]	objem
$\rho_{P.M.}$	[kg·m ⁻³]	hustota porézního materiálu
$m_{P.M.}$	[kg]	hmotnost porézního materiálu
$V_{P.M.}$	[m ³]	objem porézního materiálu
ρ_{REL}	[1]	relativní hustota
$\rho_{B.M.}$	[kg·m ⁻³]	hustota základního materiálu (bez porozity)
P	[%]	pórovitost materiálu
$E_{P.M.}$	[MPa]	Youngův modul pružnosti porézního materiálu
$E_{B.M.}$	[MPa]	Youngův modul pružnosti základního materiálu (bez porozity)
k	[1]	konstanta pro výpočet modulu pružnosti
m	[1]	konstanta pro výpočet modulu pružnosti
$\lambda_{P.M.}$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost porézního materiálu
$\lambda_{B.M.}$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost základního materiálu (bez porozity)
a	[1]	konstanta pro výpočet součinitele tepelné vodivosti
EDX	[-]	energieově disperzní spektroskopie
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
R	[MPa]	smluvní napětí
ε	[-]	poměrná deformace

1 Úvod

V současné době i přes značný rozvoj plastů v automobilovém průmyslu, je stále věnována velká pozornost výrobě kovových materiálů, které vykazují nízkou hustotu a současně dobré mechanické vlastnosti. Tyto materiály mají uplatnění tam, kde je kladen velký důraz na nízkou hmotnost. To jsou např. díly pro automobilový průmysl, kde je možnost nahradit některé kovové díly tzv. kovovou pěnou.

Kovové pěny jsou zatím pro většinu odborné veřejnosti velkou neznámou. I když jsou považovány za moderní třídu materiálů, která se začíná teprve vyvíjet, začaly se používat již na začátku 20. století. Zájem o tyto materiály ale vzrostl až v 90. letech 20. století, kdy začal jejich rozsáhlý výzkum a vývoj. S posledním vývojem se tyto materiály staly komerčně dostupnými v celé řadě struktur a vlastností. Současná generace takto vyráběných materiálů má vlastnosti s vysokým potenciálem. Jsou vyráběny řadou nových technologií, ale mnoho jich je stále ještě ve vývoji. Vyznačují se nízkou hustotou při vysoké tuhosti, vysokou mírou absorpce energie a akustickými vlastnostmi. V tomto okamžiku je většina komerčně dostupných kovových pěn na bázi hliníku nebo niklu, ale existují způsoby napěňování hořčíku, zinku, olova, mědi, bronzu, titanu, oceli a dokonce i zlata. Vzhledem k intenzitě výzkumu a vývoji se předpokládá, že rozsah dostupných pěn se v několika příštích letech rychle rozšíří, [1, 2].

V širším slova smyslu lze obecně označované kovové pěny, resp. kovové celulární systémy (buněčné systémy) rozdělit na dvě základní skupiny, viz obr. 1-1. Někdy jsou tyto materiály označovány jako lehčené kovové materiály. Někteří autoři zahrnují kovové porézní materiály do skupiny kovových „pěn“ s otevřenými buňkami.



Obr. 1-1 Základní rozdělení lehčených kovových materiálů

Problematicou výzkumu kovových celulárních systémů se zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie, FS, na Technické univerzitě v Liberci. V současné době je jejich výzkum zaměřen na výrobu, mechanické a užité vlastnosti těchto materiálů.

V této souvislosti je také cíl řešení mé diplomové práce, která je na téma: „Porézní hliníkové systémy“.

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou základních částí: teoretickou a experimentální. Teoretická část charakterizuje vlastnosti a základní způsoby výroby kovových pěn. Experimentální část se zabývá výrobou porézního hliníkového systému dle zvolené metody. Volba metody se provádí s ohledem na podmínky a dostupné vybavení na Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci. Následuje zkoušení a vyhodnocení výsledných vlastností.

Průběh a plynulost řešení této diplomové práce byla poznamenána celosvětovým výskytem koronaviru a v návaznosti s tím také omezenému přístupu do laboratoří Katedry strojírenské technologie, Fakulty strojní, Technické univerzity v Liberci od března do začátku května tohoto roku.

2 Teoretická část práce

2.1 Hliník a jeho slitiny

Přestože je hliník třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře, jeho průmyslová výroba začala teprve v roce 1859. Hliník se v přírodě vyskytuje přibližně v 250 různých minerálech. Hlavní surovinou pro výrobu hliníku je hornina bauxit. Obsah hliníku v bauxitu se pohybuje od 30 do 60 %. Proto také v závislosti na obsahu se jedna tuna hliníku získává ze čtyř až šesti tun bauxitu. Na výrobu hliníku se spotřebovává až 90 % celosvětově vytěženého bauxitu, [3].

Hliník je v dnešní době jedním z nejpoužívanějších kovů v průmyslu a má zastoupení ve všech oblastech lidské činnosti, kde splňuje nároky na funkčnost ale i na estetiku. Pro přesnější představu o využití hliníku a jeho slitin v jednotlivých odvětvích průmyslu uvádím v tabulce 2-1 celosvětovou spotřebu hliníku a jeho slitin, [3].

Tabulka 2-1 Celosvětová spotřeba hliníku a jeho slitin v roce 2002, [3]

Odvětví	Spotřeba [%]
Doprava	59,1
Stavebnictví	18,4
Strojírenství	10,3
Elektrotechnický průmysl	7,2
Potravinářský průmysl	4,3
Ostatní	0,7

2.1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Jeho význam v posledních letech neustále vzrůstá i díky jeho výhodné kombinaci fyzikálních, chemických, mechanických a technologických vlastností. Tyto vlastnosti jsou podrobněji popsány v literatuře [3] kapitola 2. Vlastnosti hliníku a jeho slitin.

a) Fyzikální vlastnosti

Jeho atomy tvoří plošně centrovanou kubickou mřížku. V důsledku toho má hliník a jeho slitiny dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Některé fyzikální vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v tabulce 2-2, [3].

Tabulka 2-2 Fyzikální vlastnosti hliníku, [3]

Vlastnosti	Hodnoty
Hustota	2,6989 g·cm ⁻³ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	235 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ (při 20 °C)
Elektrická vodivost	2,6·10 ⁸ Ω·m (při 20°C)
Atomová hmotnost	26,9815
Objemová změna při krystalizaci	6,5%

b) Chemické vlastnosti

Záporný elektronový potenciál hliníku ukazuje, že je tento kov neušlechtilý. Ale i když je neušlechtilý, na vzduchu je stálý. Příčinou je tvorba tenké a kompaktní vrstvy oxidu hlinitého, která brání další oxidaci a zajišťuje dobrou odolnost vůči vlivu atmosférického prostředí. Slitiny hliníku mají také dobrou odolnost vůči benzínu a olejům, proto je možné jeho použití v motorech. Oproti tomu má hliník a jeho slitiny špatnou odolnost vůči mořské vodě a je náchylný na elektrochemickou korozi, [3].

c) Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti čistého hliníku nejsou dobré např. mez pevnosti je 60-70 MPa, tvrdost podle Brinella je 15-20 HB, naopak jeho plastické vlastnosti jsou velmi dobré a jeho tažnost je více než 30 %. Proto se čistý hliník jako konstrukční materiál téměř nepoužívá a v konstrukcích ho můžeme najít pouze jako slitinu. Uvedené nedostatky čistého hliníku stály za vývojem a výzkumem jeho slitin, kterých je celá řada. A tyto nedostatky čistého hliníku z velké části mažou, [3, 4].

d) Technologické vlastnosti

Tato práce je zaměřena na slévárenství, proto zde není uvedena většina technologických vlastností, které jsou uvedeny v literatuře [3] kapitola 2.4 Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin. Slévárenské vlastnosti pro konkrétní slitinu, která je vybrána pro experimentální část práce, jsou uvedeny v kapitole 2.1.2 Slitiny hliníku.

2.1.2 Slitiny hliníku

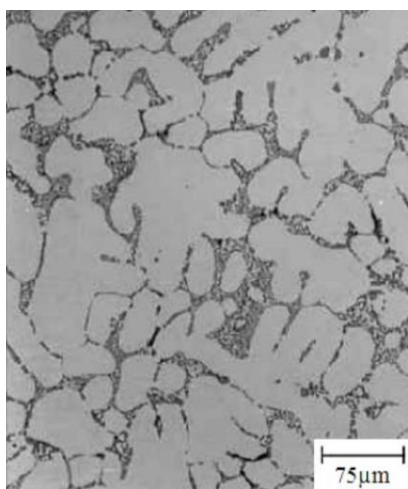
Pro výrobu slévárenských slitin hliníku se používají přísadové prvky např. Si, Cu, Mg, Zn, Ni, Mn a zároveň jejich celkový obsah přísad se pohybuje v rozmezí 4 – 25 %. Tato práce je zaměřena na výrobu hliníkového porézního materiálu ze slitiny AlSi12, proto je níže popsána pouze slitina na bázi Al – Si, [3].

Slitiny Al – Si

Slitiny Al – Si nebo také siluminy patří mezi nejdůležitější a nejpočetnější slévárenské slitiny. Siluminy obecně vykazují dobré slévárenské vlastnosti např. vysokou zabíhavost, nízký sklon k tvorbě staženin a jiné. Konkrétní vlastnosti a struktura siluminů jsou závislé na obsahu Si a jiných prvků, [3]. Tyto slitiny lze dále rozdělit podle obsahu křemíku:

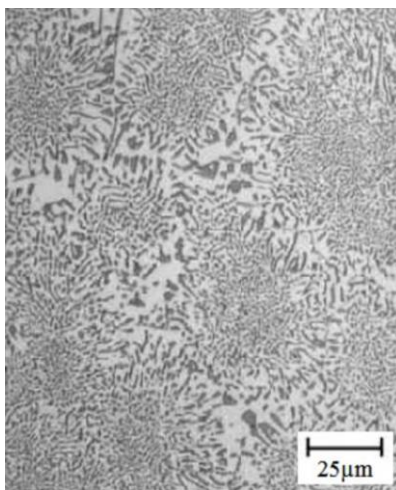
- podeutektické – obsah Si pod 12 %
- eutektické – obsah Si kolem 12 %
- nadeutektické – obsah Si nad 12 % [3]

Podeutektické siluminy patří do nejpočetnější skupiny siluminů. Ve struktuře obsahují dendrity tuhého roztoku α (Al) a eutektikum, které zaplňuje mezidendritické prostory. Vykazují nižší zabíhavost a vyšší sklon k tvorbě trhlin, proto se používají k lití tvarově jednodušších součástí. Na obr. 2-1 je znázorněna struktura podeutektických siluminů, kde jsou dendrity světlé a eutektikum zaplňuje mezidendritický prostor, [3, 4, 5].



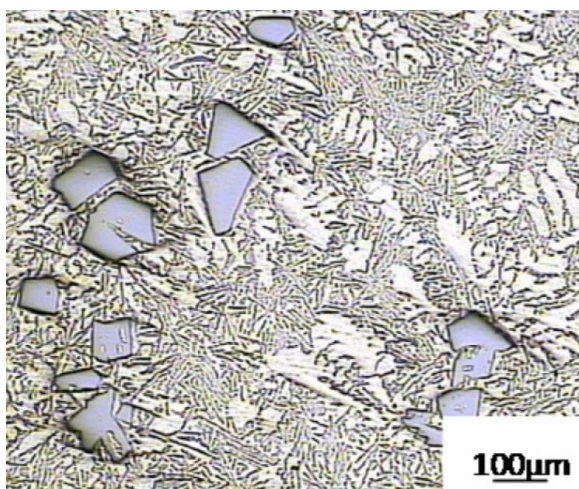
Obr. 2-1 Struktura podeutektického siluminu, [5]

Eutektické siluminy mají nejlepší slévárenské vlastnosti, vyznačují se výbornou zabíhavostí a je zde snížený sklon k tvorbě trhlin. Naleznou uplatnění u tvarově složitých i tenkostěnných odlitků. Jejich strukturu tvoří pouze eutektikum, které je znázorněno na obr. 2-2. Pro své nejlepší slévárenské vlastnosti byla vybrána eutektická slitina AlSi12 do experimentální části práce, [3, 4, 5].



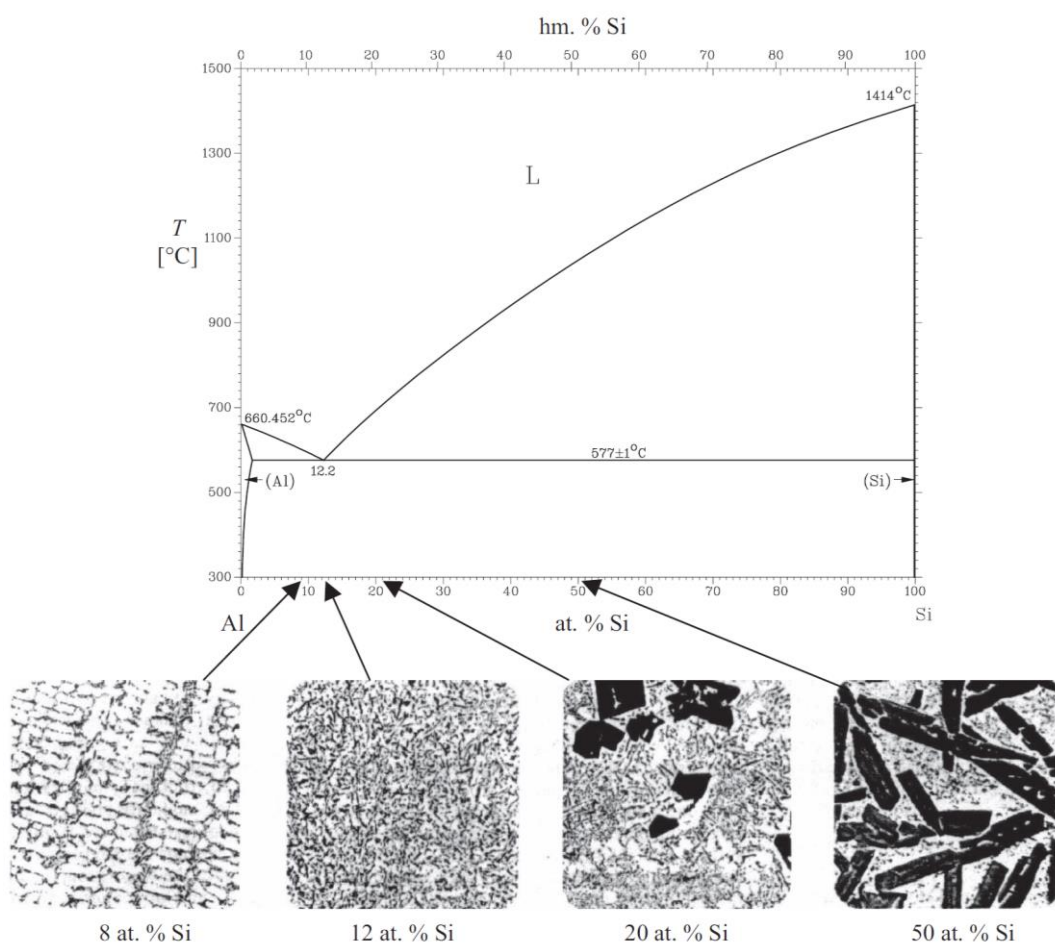
Obr. 2-2 Struktura eutektického siluminu, [5]

Nadeutektické siluminy nejsou zakotveny v normách a používají se pouze pro speciální aplikace. Jejich struktura je tvořena eutektikem a velkými krystaly křemíku, tyto krystaly vznikají vlivem větší krystalizační schopnosti křemíku ve srovnání s hliníkem. Takto vzniklé siluminy jsou křehké, proto je nutné je modifikovat a tím jim zvýšit pevnost a tvárnost. Struktura nadeutektického siluminu je znázorněna na obr. 2-3, [3, 4, 5].



Obr. 2-3 Struktura nadeutektického siluminu, [6]

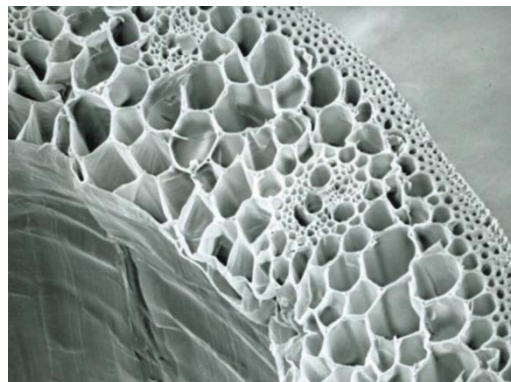
Na obr. 2-4 je uveden fázový diagram binárního systému Al – Si, který se v průběhu let téměř nezměnil. Diagram je jednoduchý eutektický systém se dvěma tuhými roztoky. Eutektická reakce probíhá přibližně při teplotě 577 °C. Maximální rozpustnost křemíku v hliníku činí $1,5 \pm 0,1$ at. % při eutektické teplotě a s klesající teplotou se rozpustnost snižuje. Pod diagramem také můžeme vidět strukturu siluminu s rostoucím obsahem Si, kterou jsme mohli vidět i na obrázcích výše, [3].



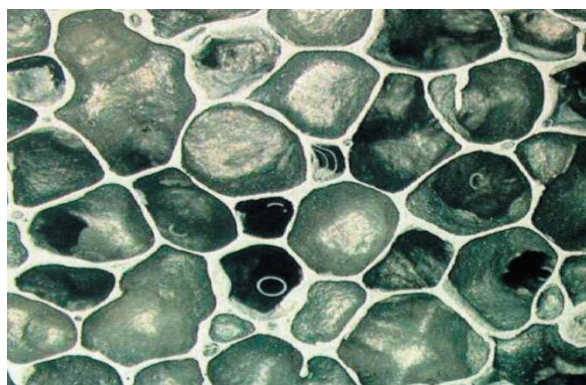
Obr. 2-4 Fázový diagram binárního systému Al – Si, [3]

2.2 Charakteristika kovových pěn

Nápad k vytvoření kovových pěn pravděpodobně vznikl inspirací z přírody, kde se vyskytuje velké množství organických látek s porézní strukturou (stonky rostlin, dřevo, koráli, kosti apod.). Příroda má funkčnost tohoto systému stavby látek ověřený po stovky milionů let. Na obrázku 2-5 je uvedena celulární struktura rostlinné stopky, která se velmi podobá vytvořené struktuře napěněného hliníku na obrázku 2-6, [3].



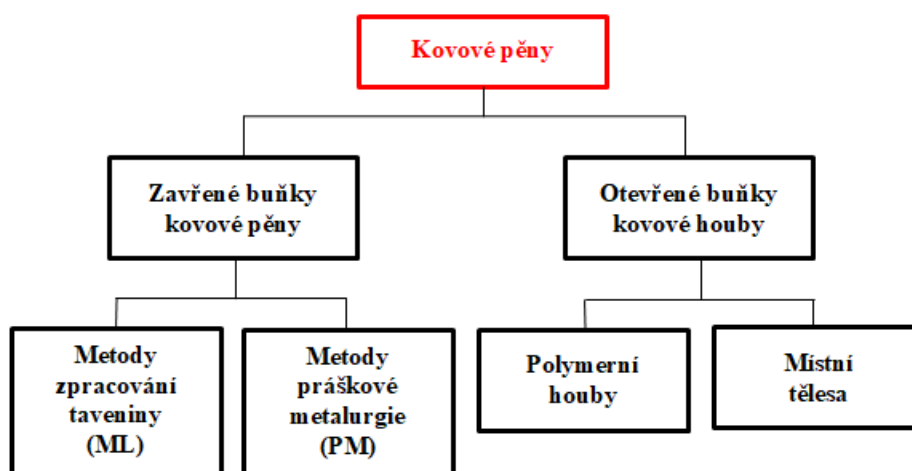
Obr. 2-5 Celulární struktura rostlinné stopky, [3]



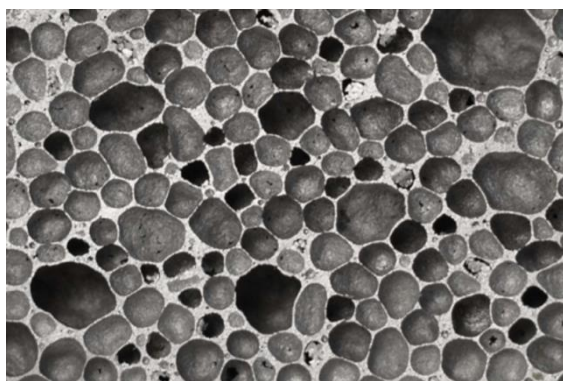
Obr. 2-6 Struktura napěněného hliníku, [3]

Celulární kovové systémy (buněčné kovové struktury) nebo-li kovové pěny jsou dnes do jisté míry relativně novým druhem kovových materiálů. Vyznačují se specifickými vlastnostmi a nalézají uplatnění v celé řadě různých odvětví průmyslu, např. automobilovém a dopravním průmyslu. Konkrétně se jedná především o použití pěn z hliníku a jeho slitin v deformačních zónách a nárazových prvcích silničních a kolejových vozidel. Tyto pěny se uplatňují z důvodu jejich dobré schopnosti pohlcování nárazové energie. Vzhledem k relativně vysoké obtížnosti výroby a složitosti vývoje nových celulárních kovových materiálů, je velmi důležité stanovení jejich mechanických a fyzikálních hodnot. Zpočátku hodnoty těchto veličin byly

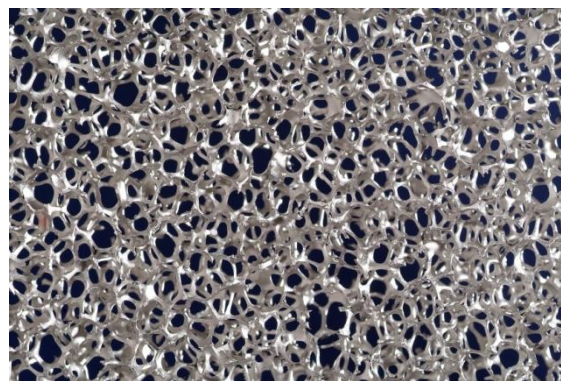
ověřovány především experimentálně. Tento přístup sice dává spolehlivé výsledky, avšak velkou nevýhodou je finanční náročnost speciálních měřících zařízení a cena zkoumaných vzorků. Postupně se vyvíjí metodika a jsou navrhovány způsoby zkoušení mechanických vlastností. Dnes již existuje celá řada porézních systémů, které jsou vyráběny různými technologiemi. Různí autoři uvádějí odlišná rozdělení. O rozdělení obecně označovaných kovových celulárních materiálů se pokusil BANHART [7, 8], GARCIA-MORENO [9], provedl rozdělení kovových pěn a vychází ze dvou, již uváděných, základních skupin (pěny se zavřenými nebo otevřenými buňkami).



*Obr. 2-7 Rozdělení kovových celulárních materiálů (kovových pěn)
podle GARCIA-MORENA, [9]*



Obr. 2-8 Kovová pěna s uzavřenými buňkami, [10]



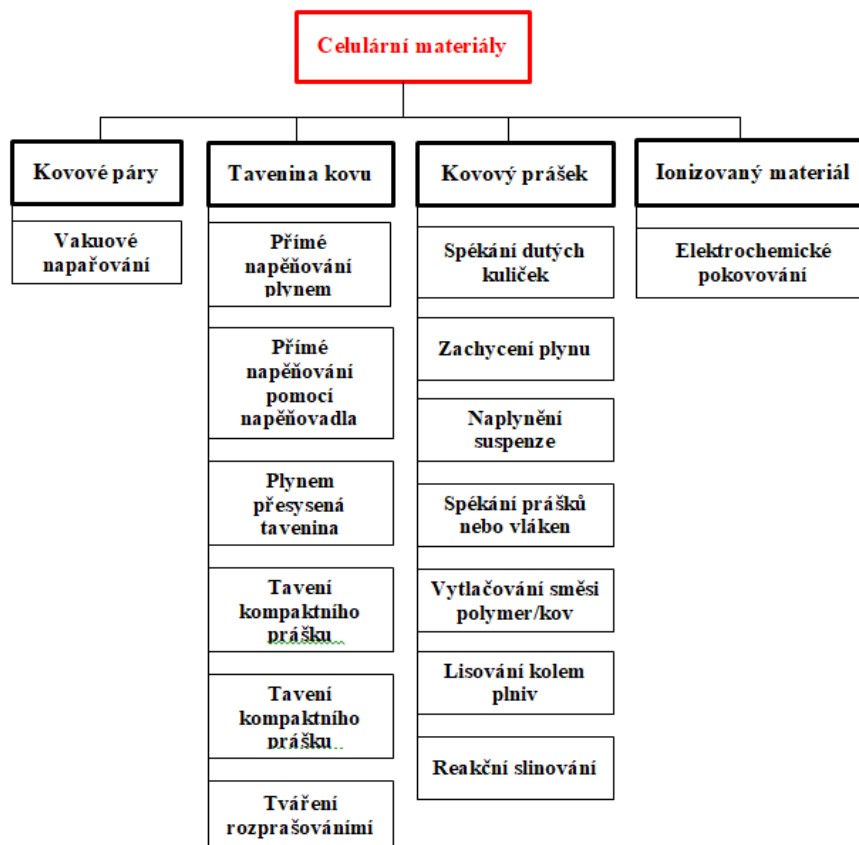
Obr. 2-9 Kovová pěna s otevřenými buňkami, [11]

Porézní buněčné kovové materiály mají v posledním desetiletí značné průmyslové uplatnění a jsou hledány další metody jejich výroby. Kovové lehčené systémy na bázi lehkých kovů, zejména hliníku a jeho slitin jsou materiály pro výrobu konstrukčních prvků a dílů v mnoha odvětvích, a to díky neobvyklé kombinaci vlastností, které nabízejí, tj. nízká hmotnost, vysoká absorpční kapacita energie, vysoká tuhost a vysoké tlumení. Tyto materiály slouží v různých aplikacích, z nichž některé jsou založeny na významných mechanických vlastnostech (zejména pěny s uzavřenými buňkami), zatímco jiné jsou založeny na reologických vlastnostech a transportních procesech, což je umožněno přístupností otevřených pórů k pronikání a proudění tekutiny (pěny s otevřenými buňkami) nebo porézní kovové materiály, [7, 8].

2.3 Technologie výroby kovových pěn s uzavřenými buňkami

Jak uvádí GERGELY a CLYNE [12], v současné době existují dva základní způsoby výroby hliníkových pěn s uzavřenými buňkami na základě taveniny hliníku. Jeden proces byl vyvinut v Japonsku, který zahrnuje přidání, resp. vmíchávání vápníku do roztaveného hliníku. Tím se vytváří dispergované pevné částice vápníku v tavenině hliníku, které mají za úkol zvýšení viskozity taveniny. V dalším kroku se provádí napěňovací proces. Tím že se do taveniny hliníku přidává napěňovací činidlo (např. prášek TiH_2 , jehož tepelný rozklad vytváří plyn pro napěňování taveniny). Druhý proces byl patentován společností Alcan. Principem této metody je probublávání taveniny hliníku plynem, obvykle vzduchem. Tavenina hliníku musí obsahovat částice karbidu křemíku, které ovlivňují zachování napěněných buněk taveniny, stoupajících na povrch taveniny. U této metody je napěněná tavenina přiváděna na pohyblivý pás, kde probíhá její tuhnutí.

Alternativním způsobem výroby hliníkových pěn s uzavřenými buňkami je dán na základě práškové metalurgie, viz dále. Charakteristika výrobních metod celulárních systémů podle BANHARTA [8] je na obr. 2-10.



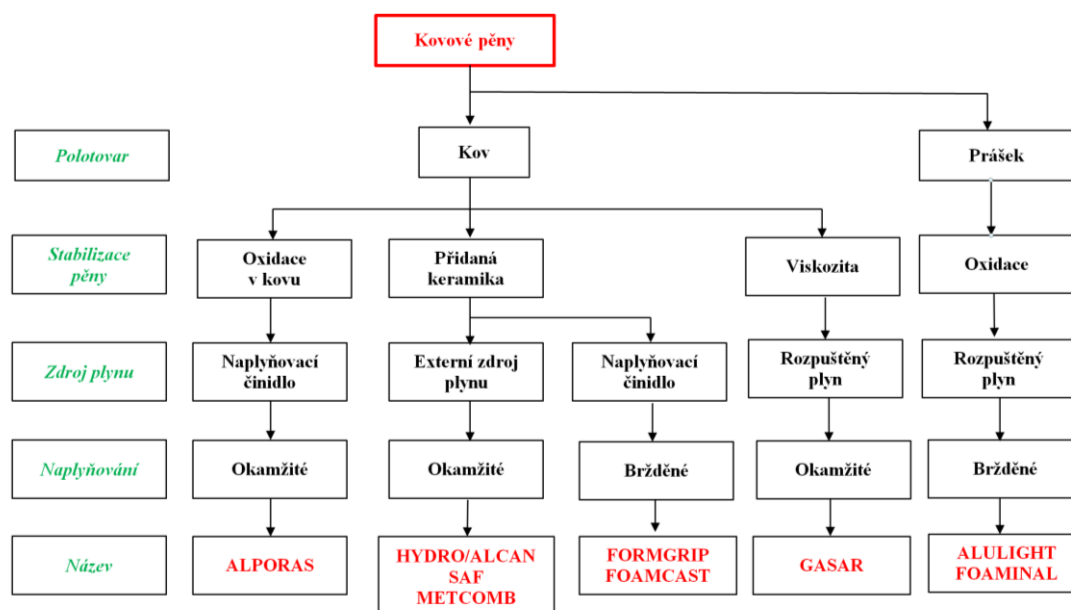
Obr. 2-10 Charakteristika výrobních metod celulárních materiálů podle BANHARTA, [8]

Kovové páry - principem při výrobě kovových pěn z kovových par (nebo plynných sloučenin kovů) je kondenzace ve vakuu vytvořené páry na „modelu“ - polymerní pěně. Kondenzující kov pokrývá povrch polymerního modelu a vytváří vrstvu určité tloušťky, závislé na měrné hmotnosti páry a době jejího působení. Následně se polymer odstraní tepelným nebo chemickým zpracováním, [8].

Kovový prášek - při tomto procesu zůstává prášek během celého výrobního procesu v tuhé fázi a je zpracováván pouze spékáním nebo jinými operacemi. Tento fakt je rozhodující pro výslednou morfologii výsledné vnitřní buňkové struktury. Při výrobě pěny z tekuté fáze vznikají pod vlivem povrchového napětí převážně uzavřené póry, naopak pěny vyrobené spékáním kovových prášků mají strukturu s relativně kulatými částicemi spojenými mezi sebou v místech natahování. V současné době je spékání kovových vláken či prášků nejjednodušším způsobem výroby porézních kovů a je hojně využíván v práškové metalurgii, [8].

Ionizovaný kov - materiál kovové pěny je při tomto procesu vytvořen elektrickým pokovením polymerní pěny s otevřenými póry. Aby mohlo dojít k pokovení, je nutné, aby byla polymerní pěna elektricky vodivá. Toho je dosaženo ponořením polymerní pěny do elektricky vodivého roztoku na bázi grafitu nebo sazí. Konečnou operací je žihání, kdy je polymerní pěna odstraněna, [8].

Tekutý kov - jednou z možností výroby porézního materiálu z tekuté fáze je přímé zpěnění taveniny plynem či zpěňovadlem. Možné je rovněž použití slévarenských metod, např. technologie s využitím odpařitelného jednorázového modelu nebo infiltrace tekutého kovu do dutiny formy vyplněné pevným materiálem definovaného tvaru a geometrie (prekurzoru, preformy), který je po ztuhnutí kovu odstraněn a zanechá póry ve struktuře materiálu. Další možností výroby je natavení práškových výlisků obsahujících zpěňovadlo, které při rozkladu uvolňuje plyn, [8]. Na obr. 2-11 je přehled kovových pěn, resp. kovových celulárních systémů.



Obr. 2-11 Přehled celulárních systémů, resp. kovových pěn podle [7] a doplněných podle současnosti

2.4 Technologie výroby kovových porézních materiálů s otevřenými buňkami

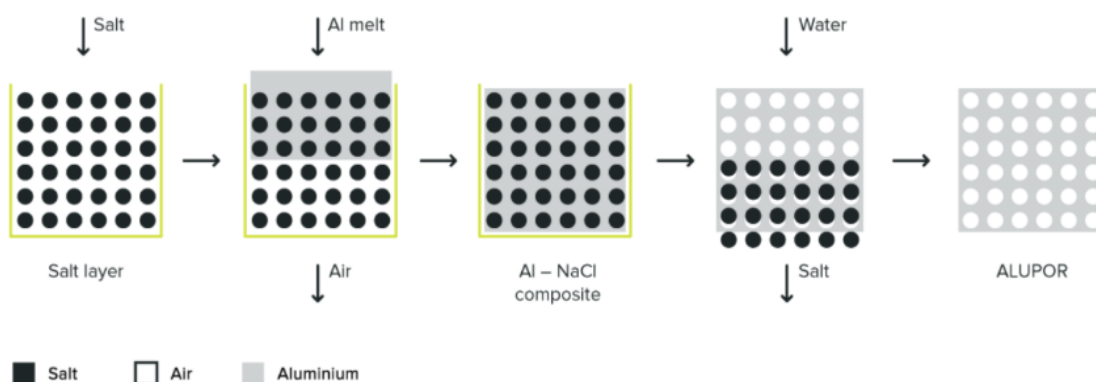
Výroba kovových porézních materiálů představuje řadu různých způsobů, kde se při každé z těchto metod aplikuje pravidelné rozložení těles nepatrných rozměrů, které jsou nejčastěji rozpustné ve vodě. V anglické literatuře tyto způsoby výroby jsou označovány „Space Holder Technique - SHT“ (technika držáku prostoru), neboli Space Holder Particles – SHP. Těmito nepatrnými tělesy může být např. NaCl. Jejich přítomností se zvyšuje porozita kovu, která je založena na následném vyluhování těchto částic ve vodě. Výsledkem je snížení hustoty takto vyrobeného porézního kovového materiálu. V některých zahraničních publikacích je tato metoda označována jako metoda s použitím různě velkých částic NaCl. Těmito částicemi mohou být další materiály, které v průběhu výroby porézních systémů např. vyhoří nebo se vytaví, atd. Při výrobě kovových porézních materiálů je důležité, jakým způsobem se dostává tavenina mezi zrna vodou vyluhovatelných těles. Může to být infiltrací taveniny ve vakuu, infiltrací taveniny během odstředivého lití nebo gravitačním litím. Speciální technologie výroby kovových porézních systémů je založena na použití směsi prášku kovu a částic, které vytváří porozitu kovového materiálu. Kovové porézní materiály jsou také v některých případech označovány jako kovové „pěny“ a jejich výroba je založena na tzv. replikaci, to je myšleno na zhotovení otisku např. částic NaCl. Tyto technologie vedou k výrobě kovových materiálů s otevřenými buňkami (póry). Kovové porézní materiály se využívají pro funkční aplikace, jako je filtrace, zvuk absorpce, tepelná izolace, výměna tepla, absorpce energie, čištění vzduchu a vody, [1].

V kapitole 2.4.1 je popsána výroba porézních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvarů NaCl. Tato metoda výroby pomocí NaCl byla vybrána jako příklad. Na popsání všech metod by bylo potřeba desítky stránek, na které v diplomové práci není kapacita. Tato metoda se podobá metodě vyvinuté na pracovišti katedry strojírenské technologie, FS – TUL v Liberci, pomocí které byli vyrobeny vzorky v experimentální části.

2.4.1 Výroba porézních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvarů NaCl

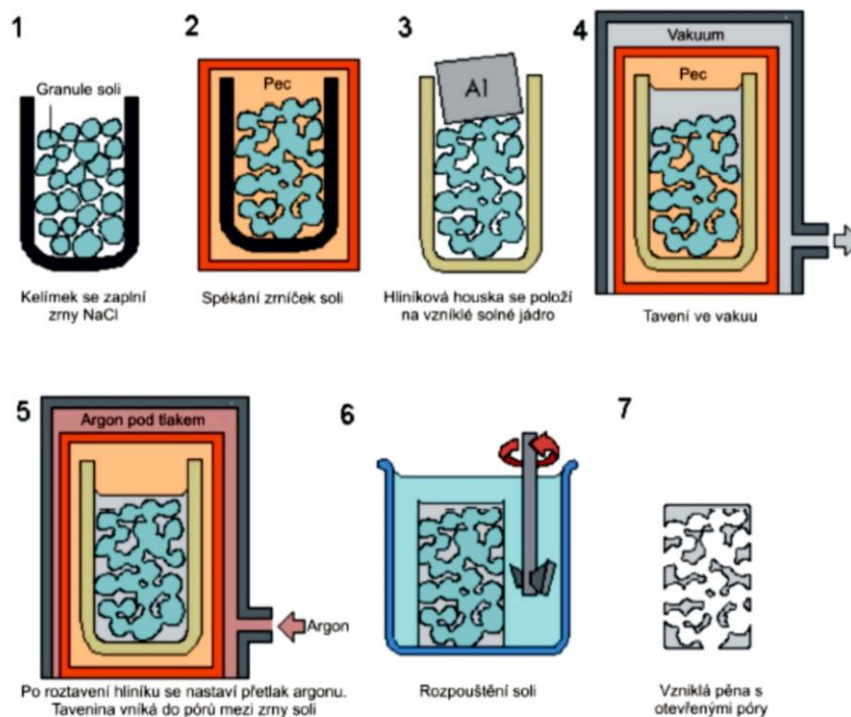
Pokud se týká výroby kovových porézních materiálů, tak v odborné literatuře je tato metoda označena s použitím prostorových útvarů NaCl. I když základním mechanismem proniknutí taveniny mezi zrna NaCl je různý způsob infiltrace. Současně je také důležité množství NaCl. Použitím 30 hm. % NaCl pro výrobu porézního systému se získá materiál s mírnou pórovitostí. Tak jako u výroby kovových, resp. hliníkových pěn, ani v tomto případě není výroba porézního hliníkového materiálu jednoduchá. Na obr. 2-12 je uvedeno poměrně jednoduché schéma výroby porézních kovových materiálů, tak je ho prezentuje výrobce Alumeco Group [13]. Toto schéma představuje infiltrační proces taveniny kovu mezi částice NaCl.

Na obr. 2-13 uvedeno obrázkové schéma, podle kterého je již možnost vyšší výroby kovového porézního materiálu, tak jak je prezentováno při výrobě materiálu, který je známý pod obchodním názvem ALUPOR. Velikost pórů a poměr mezi maximální a minimální velikostí pórů úzce souvisí se získáním příslušných mechanických vlastností, popř. i vlastností filtračních. Na obr. 2-14 je podrobnější blokové schéma výroby porézních materiálů, dle kterého je již vyšší záruka získání požadovaného porézního materiálu.

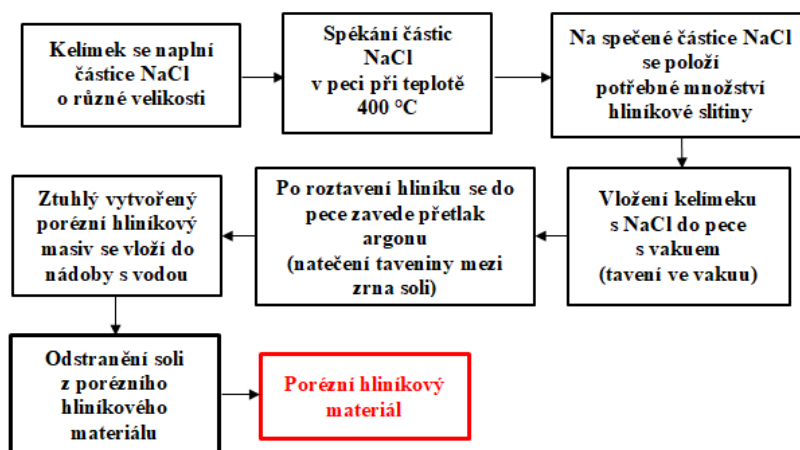


1 - naplnění formy krystaly soli - NaCl, (vytvoření vrstvy soli), 2 - impregnace vrstvy soli ve formě roztaveným hliníkem za působení vakua nebo tlaku, 3 - natavením hliníku a jeho ochlazením se vytvoří kompozitní systém (hliník-NaCl), 4 - vložení kompozitního systému do vody se rozpustí zrna soli ve vodě, případné obrábění kompozitu za cílem získání požadovaného tvaru výrobku, 5 - získaný porézní hliníkový materiál

Obr. 2-12 Schéma výroby hliníkového porézního systému, dle firmy Alumeco Group, [13]



Obr. 2-13 Schéma výroby porézních lehčených materiálů ze slitin hliníku a NaCl podle CURRANA, [14]



Obr. 2-14 Schéma výroby kovových porézních systémů na bázi NaCl (ALUPOR) [13], ale podle CURRANA, [14]

Na obr. 2-15a) je ukázka výroby porézního hliníku, v okamžiku sypání soli do formy a následná impregnace soli taveninou hliníku pro vznik kompozitního systému Al-NaCl je součástí výrobního kroku porézního hliníku, ALUPOR. Na obr 2-15b) je výroba porézního hliníku, v okamžiku lití taveniny hliníku na lože NaCl za vzniku kompozitního systému Al-NaCl, ALUPOR [13]. Na obr. 2-15c) jsou výrobky z porézního hliníkového materiálu (při výrobě použity částice NaCl), Composite Material Ltd., ALUPOR. Výrobce těchto porézních materiálů je firma Alumeco Group. Porozita těchto porézních materiálů je 55 až 75%. Hustota takto vyrobeného porézního hliníku je závislá na stupni poréznosti (porozity), dosahuje hodnotu 1000 až 1400 kg·m⁻³, což je téměř o třetinu nebo polovinu méně než je hustota zcela kompaktního hliníku.

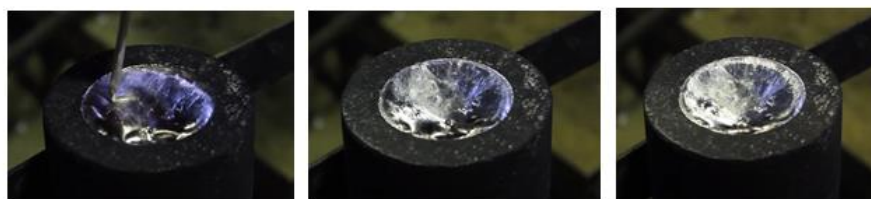
Porézní hliník slouží jako účinná náhrada slinutých kovů, hliníkových pěn a kovových hub. Je to stoprocentně otevřený porézní materiál a je vhodný pro výměnu sintrovaných kovových filtrů s filtrací od 5 do 200 μm. Tyto materiály mohou sloužit pro výrobu filtrů pracujících při teplotách 250 až 300 °C. Aplikace tohoto materiálu jsou pro výměníky tepla, vakuové stoly, absorpce energie a tlumiče nárazů, [13].

Kovové porézní materiály, které jsou v některých případech označovány, jako kovové pěny vyráběné pomocí replikace jsou zajímavým materiálem. I když bylo dosaženo velkého pokroku v pochopení jejich vztahů mezi strukturou a vlastnostmi, velký počet různých technik zpracování, z nichž každý vyrábí materiál s různými vlastnostmi a strukturou, znamená, že pochopení jednotlivých účinků všech aspektů struktury není úplné. Replikace je jednou ze zpracovatelských technik používaných pro výrobu porézních kovových systémů (označováno kovové houby, které mají otevřené póry). Pro výrobu hliníkové pěny, resp. porézního hliníkového materiálu, se používá např. slitina hliníku AlSi12 nebo např. AlSi7Mg, atd. Z těchto slitin se připravuje odlitek válcového tvaru, který se vkládá do formy na vrstvu infiltrační NaCl nebo se tavenina vlévá do formy s NaCl a postupně infiltruje mezi její zrna, viz obr. 2-12, [13].

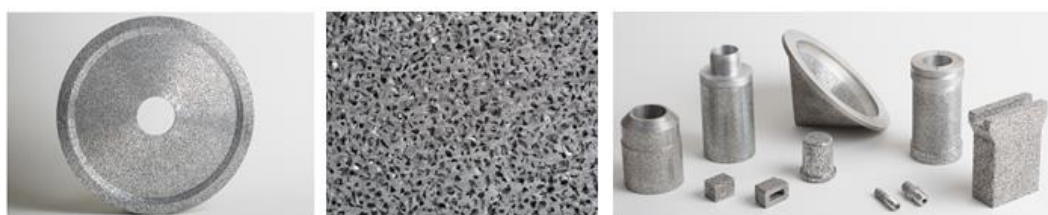
Profesionálně vyráběné porézní materiály s použitím částic NaCl mají komerční označení *EXXCENTIS* nebo *ALUPOR*. Exxcentis je švýcarská firma. Materiál pod označením ALUPOR – Composite Material Ltd., sverdlovská oblast, Rusko. Jejím technickým partnerem je firma Alumeco Group, Denmark.



Obr. 2-15a) Výroba porézního hliníku, v okamžiku sypání soli do formy a s následnou impregnací soli taveninou hliníku pro vznik kompozitního systému Al-NaCl, ALUPOR, [13]



Obr. 2-15b) Výroba porézního hliníku, po odlití taveniny hliníku na lože NaCl za vzniku kompozitního systému Al-NaCl, ALUPOR, [13]



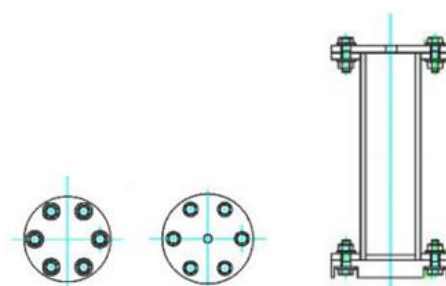
Obr. 2-15c) Výrobky z porézního hliníkového materiálu (při výrobě použity částice NaCl), Composite Material Ltd., ALUPOR, [13]

Výzkumníci na Univerzitě v Sheffieldu provádí výrobu porézních hliníkových systémů [15, 16], v následující kapitole je i ukázka výroby hliníkového porézního systému. Kde porozitu tuhého hliníkového systému (materiálu) tvoří částice kuchyňské soli, což funguje na principu „solných jadérek.“ Princip je v tom, že ve formě tvaru válce je zahřívána hliníková tableta (cca Ø 50 x 30 mm) spolu se solí, která je nasypána

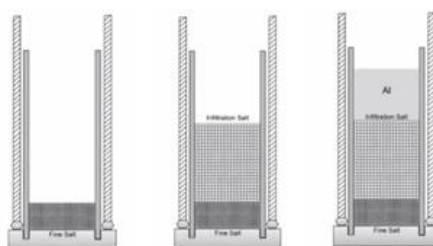
do spodní části formy. Forma, resp. trubka má výšku cca 145 mm a z obou stran je uzavřena přírubami, které svírají 4 šrouby. Horní příruba je opatřena vývodem pro napojení hadic ve tvaru T. Jeden vývod slouží pro vývod k napojení vývěvy pro tvorbu vakua v pracovním prostoru válcové části formy. Druhý vývod T trubice slouží pro přívod argonu. Na experiment je třeba cca 300 až 500 mg soli. Pak se vloží tableta příslušného kovu např. hliníku nebo jeho slitiny. Na obr. 2.16 a) je ukázka jemné soli a infiltrační soli (sůl pro výrobu porézních kovových systémů), NaCl a dále schéma formy i forma. Na obr. 2.16 b) je schéma formy se dvěma uzávěry ve tvaru přírub. Na obr. 2.17 je schéma formy, vrstev soli a tablety hliníku. Postup přípravy vyráběných hliníkových porézních materiálů je na obr. 2.18 až obr. 2-23, [15, 16].



Obr. 2-16 a) Různé typy soli nebo solných tělísek a technické údaje pro výrobu formy [15]



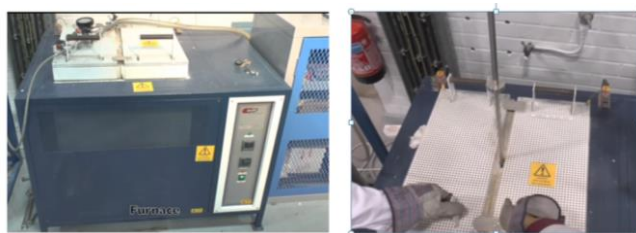
Obr. 2-16 b) Schéma formy pro výrobu hliníkových porézních systémů [15]



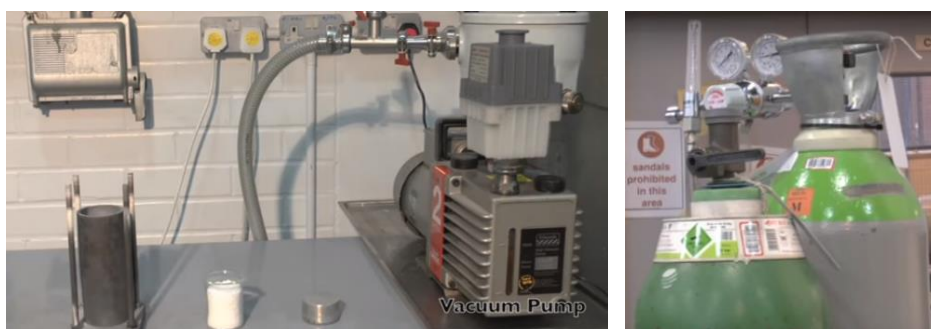
Obr. 2-17 Schéma zaplňování dutiny formy jemnou solí, solí na vytváření porezity (infiltrační sůl) a hliníkem, LUNA [15, 16]



Obr. 2-18 Kuchyňská sůl - NaCl, hliníková tableta a forma [15]



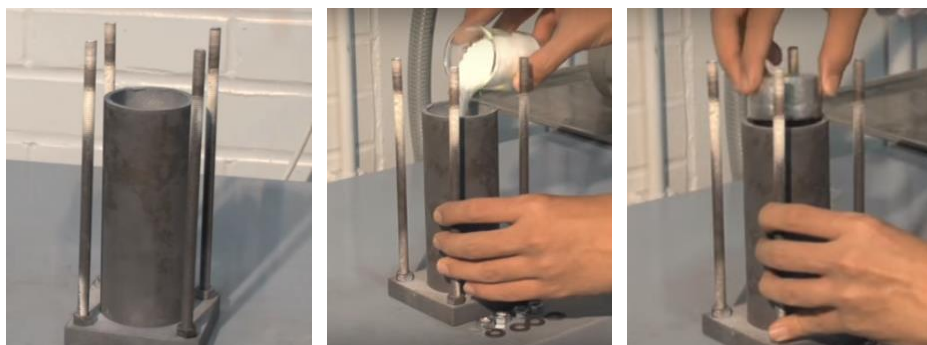
Obr. 2-19 Odporová pec speciální konstrukce s dělenými dvířky v horní partii pece [15]



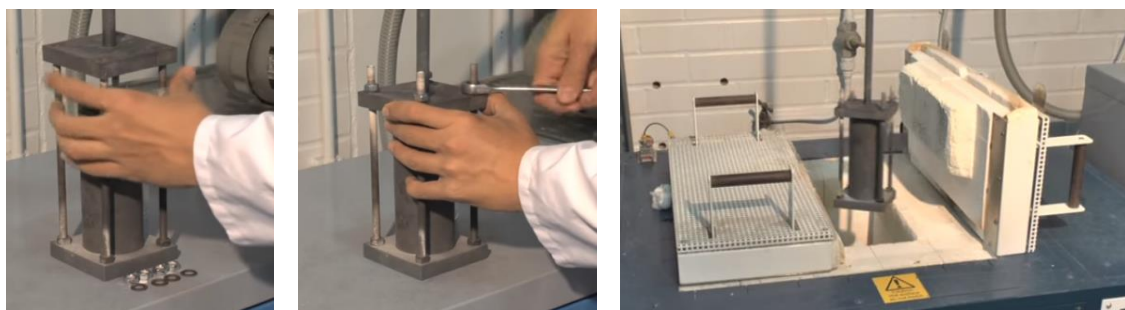
Obr. 2-20 Pohled na formu, kuchyňskou sůl, hliníkovou tabletu a tlakové nádoby s argonem, LUNA [15]



Obr. 2-21 Ošetření dutiny formy před technologickým procesem výroby porézního systému, LUNA [15]



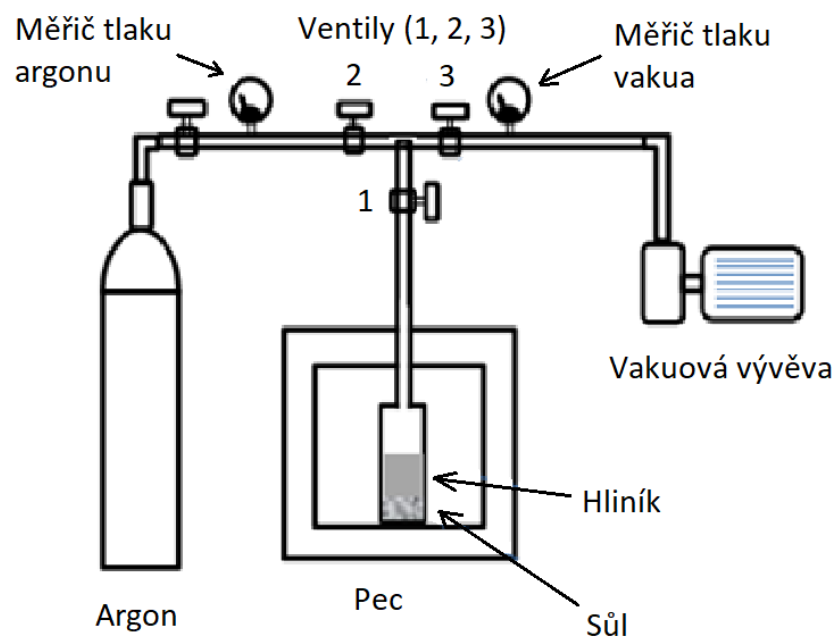
Obr. 2-22 Forma, vsypání kucyňské soli do formy a vložení hliníkové tablety do formy, [15]



Obr. 2-23 Sestavení horní příruby a sevření 4 šrouby, vkládání formy do pece [15]

Po vložení formy do pece musí být z pracovního prostoru formy vysátý vzduch. To se provádí s využitím vývěvy a speciálního vedení s manometrem. A provádí se odsátí vzduchu, resp. vytvoření vakua, [15, 16].

Jak je z výše uvedeného patrné, výzkumníci na Univerzitě v Sheffieldu vyrábí hliníkové porézní systémy na bázi infiltrace taveniny mezi zrna NaCl ve speciální formě s využitím vakua a argonu, schéma zařízení je na obr. 2-24 , [15, 16].



Obr. 2-24 Schéma zařízení pro výrobu porézních hliníkových materiálů pomocí zrn soli – NaCl [15]

3 Experimentální část

3.1 Cíle experimentu

Cílem experimentální části diplomové práce je výroba vzorků hliníkových porézních materiálů z vybrané slitiny AlSi12 s použitím chloridu sodného s určitou velikostí částic. Následně zjištění a vypočtení daných vlastností vyrobených vzorků.

Experimentální část byla provedena na pracovišti Katedry strojírenské technologie, FS – TU v Liberci, na kterém se problematikou výzkumu kovových celulárních systémů zabývají pracovníci katedry. Volba metody výroby vzorků byla provedena s ohledem na podmínky a dostupné vybavení na katedře. Pro výrobu těchto porézních hliníkových materiálů nebyla zvolena klasicky k těmto účelům používaná infiltrační metoda, která je popsána v kapitole 2.4.1 *Výroba porézních kovových dílů s použitím taveniny kovů a prostorových útvarů NaCl*. Ale na pracovišti katedry byla vyvinuta a odzkoušena nová metoda, která je založena na lisování příslušných částic soli do taveniny slitiny AlSi12 v ohráte slévárenské formě.

3.2 Charakteristika použitých materiálů

Pro vytvoření porézních vzorků jsou použity dva základní komponenty, kterými jsou chlorid sodný o různých velikostech jejich částic a vybraná slitina AlSi12.

3.2.1 Charakteristika použitého chloridu sodného

K vytvoření porozity v hliníkovém systému slouží částice chloridu sodného běžně označovaného jako kuchyňská sůl nebo jedlá sůl. Její teplota tání je 801 °C proto částice soli po odlití se slitinou AlSi12 zůstanou v celku a vytvoří požadovanou strukturu v tuhnoucí slitině. Na výrobu vzorků byly použity částice o velikostech 8 – 10, 5 – 7 a 3 – 5 mm, viz obr. 3-1.



Obr. 3-1 Použité velikosti částic chloridu sodného

3.2.2 Charakteristika slévárenské slitiny AlSi12

Z důvodu dobrých slévárenských vlastností byla použita slitina hliníku AlSi12, její teplota tání je 577 °C v nemodifikovaném stavu slitiny před jejím odléváním (po modifikaci je teplota tavení 560 °C). V tabulce 3-1 je uvedeno chemické složení použité slitiny, které bylo stanoveno na zařízení Brucker q4 TASMÁN (optický emisní spektrometr). Tavenina byla připravena v elektrické odporové peci „Classic“ viz obr. 3-2.

Tabulka 3-1 Stanovené chemické složení slitiny AlSi12

Chemické složení slitiny AlSi12 [%]										
Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	V	Mg	Na	Pb	Al
11,9	0,45	0,41	0,05	0,11	0,1	0,008	0,001	0,005	0,005	86,96



Obr. 3-2 Elektrická odporová pec „Classic“

3.2.3 Výpočet množství soli a slitiny pro výrobu vzorků

Výroba vzorků byla provedena ve formě s dutinou komolého kužele, viz obr. 3-3. Výpočet objemu dutiny formy komolého kužele byl vypočítán podle obecně známého vzorce:

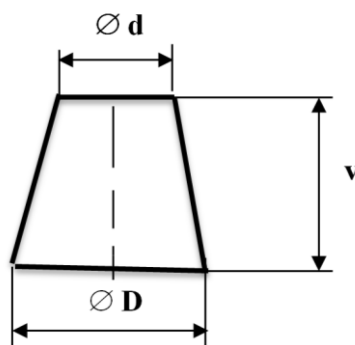
$$V_f = \frac{\pi \cdot v}{12} \cdot (D^2 + d^2 + D \cdot d) \quad (1)$$

kde je: V_f – objem vnitřku formy na vzorky [m^3]

v – výška vzorku [mm]

D – větší průměr vzorku [mm]

d – menší průměr vzorku [mm]



$$\text{Ø } D = 47 \text{ mm}; \text{Ø } d = 40 \text{ mm}; v = 40 \text{ mm}$$

Obr. 3-3 Schéma dutiny formy tvaru komolého kužele

Dosažením hodnot podle obr. 3-3 do rovnice (1) lze vypočítat objem (V_f), který se rovná $5,9575 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Při výrobě hliníkového porézního systému byl předpoklad, že 50 % objemu formy bude zaplněn hliníkovou slitinou (AlSi12), a 50 % objemu formy bude zaplněn chloridem sodným (NaCl). Lze vypočítat, že objem pro slitinu je:

$$V_{SLIT} = 0.5 \cdot V_f = 2.978 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \quad (2)$$

kde je: V_{SLIT} – objem použité slitiny hliníku (AlSi12) [m^3]

V_f – objem vnitřku formy na vzorky [m^3]

$$V_{NaCl} = 0.5 \cdot V_f = 2.978 \cdot 10^{-5} [m^3] \quad (3)$$

kde je: V_{NaCl} – objem použitého chloridu sodného $[m^3]$

V_f – objem vnitřku formy na vzorky $[m^3]$

Dále pro výpočet hmotnosti m byl použit známý vztah:

$$m = \rho \cdot V \quad (4)$$

kde je: m – hmotnost $[kg]$

ρ – hustota $[kg \cdot m^{-3}]$

V – objem $[m^3]$

Dle vzorce (4) byli vypočítány hmotnosti slitiny (AlSi12) a chloridu sodného (NaCl), které přijdou do formy tak, aby dle objemu obě přísady zaujímali 50 %. Vypočtené hmotnosti přísad jsou zaznamenány v tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Vypočítaná hodnota objemu chloridu sodného a objemu taveniny AlSi12

Výpočet hmotnosti chloridu sodného		
Hmotnost NaCl m_{NaCl} [kg]	Objem NaCl V_{NaCl} [m³]	Hustota NaCl ρ_{NaCl} [kg·m⁻³]
0.065	$2.978 \cdot 10^{-5}$	2165
Výpočet hmotnosti slitiny hliníku AlSi 12		
Hmotnost AlSi12 m_{AlSi12} [kg]	Objem AlSi12 V_{AlSi12} [m³]	Hustota AlSi12 ρ_{AlSi12} [kg·m⁻³]
0.079	$2.978 \cdot 10^{-5}$	2650

3.3 Postup výroby vzorků

Jak bylo zmíněno výše, pro výrobu vzorků nebyla použita klasicky k těmto čelům používaná infiltrační metoda. Ale na pracovišti katedry byla vyvinuta a odzkoušena nová metoda, která je založena na lisování příslušných částic soli do taveniny slitiny AlSi12 v ohřáté slévárenské formě.

3.3.1 Natavení hliníku a ohřátí formy

Nejdříve bylo do tavicího kelímku vloženo požadované množství slitiny hliníku AlSi12. Poté byl kelímek vložen do pece, aby se slitina hliníku natavila a ohřála na požadovanou teplotu přibližně 720 °C. V průběhu ohřevu slitiny byla do pece vložena forma, která se nechala ohřát na teplotu přibližně 550 °C. A na konec byl do pece ještě vložен chlorid sodný o zvolené velikosti jeho částic, který se nechal předeřhát na teplotu přibližně 150 °C.

3.3.2 Odlévání vzorků

Po dosažení požadované teploty k odlévání, byla nahřátá forma vyndána a do ní byl nasypán předeřhátý chlorid sodný. Také byl vyndán kelímek s natavenou slitinou hliníku. Ze slitiny hlinku byla odstraněna struska, která se vytvořila na povrchu, viz obr. 3-4. Poté byla slitina hliníku nalita do formy, viz obr. 3-5. A forma byla uzavřena.



Obr. 3-4 Odstranění strusky z nataveného hliníku Obr. 3-5 Odlévání hliníku do formy

3.3.3 Nalisování chloridu sodného do taveniny hliníku

Na hydraulickém lisu proběhlo nastavení parametrů, které již byly odzkoušeny pracovníky katedry. Uzavřená forma byla přenesena pod beran hydraulického lisu, viz obr. 3-6. Následně proběhlo nalisování chloridu sodného do taveniny slitiny hliníku, jak můžeme vidět na obr. 3-7. Po nalisování se nechala forma vychladnout. Následovalo vytažení vzorků z formy a odstranění přetoků. A nakonec po vychladnutí vzorku následovalo vyvaření granulí soli.



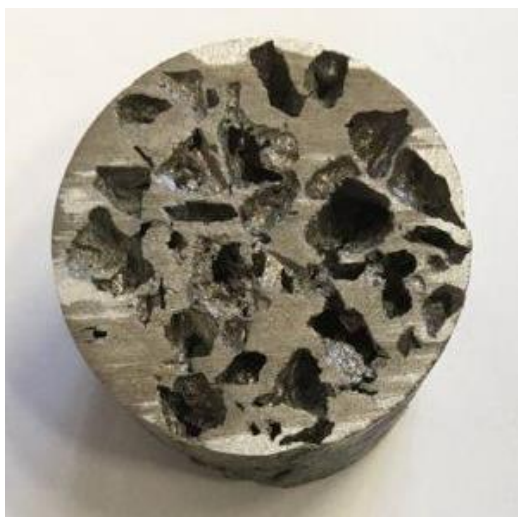
Obr. 3-6 Hydraulický lis



Obr. 3-7 Lisování soli se slitinou hliníku

3.3.4 Vyrobené vzorky

Výše uvedený postup byl proveden pro šest vzorků s použitím rozdílných velikostí částic chloridu sodného. Pro každou velikost soli, tedy 8 – 10, 5 – 7 a 3 – 5 mm byly vytvořeny dva vzorky, viz obr. 3-8, obr. 3-9, obr. 3-10. Na obr. 3-11 je ukázka dvou vyrobených vzorků hliníkových porézních materiálů, dole je pro porovnání pohled na strukturu porézního materiálu, který byl vyroben firmou Exxentis. Rozměry a bližší identifikace vyrobených vzorků jsou uvedeny v tabulce 3-3.



Obr. 3-8 Vyrobené vzorky s použitou velikostí soli 7-10 mm (1, 2)



Obr. 3-9 Vyrobené vzorky s použitou velikostí soli 4-7 mm (3, 4)



Obr. 3-10 Vyrobené vzorky s použitou velikostí soli 3-5 mm (5, 6)



Obr. 3-11 Ukázka dvou vyrobených vzorků (1) a (3) hliníkových porézních materiálů, dole struktura materiálu vyrobeného firmou Exxentis

3.4 Geometrické a fyzikální vlastnosti vzorků

Vzorky byly označeny postupně dle obrázků výše, podle použité velikosti částic soli. Pomocí posuvného měřidla byly změřeny jejich rozměry a pomocí digitální váhy změřena jejich hmotnost. Poté byl vypočten objem vzorků podle rovnice (5). A následně hustota vzorku podle rovnice (6). Změřené a vypočtené hodnoty byly přehledně zaznamenány do tabulky 3-3.

Stanovení objemu vzorku V :

$$V = \frac{\pi \cdot v}{12} \cdot (D^2 + d^2 + D \cdot d) \quad (5)$$

kde je: V – objem [m^3]

v – výška vzorku [mm]

D – větší průměr vzorku [mm]

d – menší průměr vzorku [mm]

Stanovení hustoty vzorku ρ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

kde je: ρ – hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m – hmotnost [kg]

V – objem [m^3]

Tabulka 3-3 Geometrické a fyzikální vlastnosti vzorků vyrobených porézních hliníkových materiálů

Základní rozměry a hustota vyrobených vzorků z hliníkového porézního materiálu							
Označení Vzorku	Velikost Částic NaCl [mm]	Základní rozměry vzorku			Hodnoty pro výpočet hustoty		
		Průměr D [mm]	Průměr d [mm]	Výška v [mm]	Hmotnost m [kg]	Objem V [m³]	Hustota ρ [kg·m⁻³]
1	8 – 10	45,5	41,2	27,0	0,0380	$3,986\cdot 10^{-5}$	953,27
2	8 – 10	45,5	41,2	28,3	0,0405	$4,178\cdot 10^{-5}$	969,32
3	5 – 7	45	42,5	24,1	0,0360	$3,622\cdot 10^{-5}$	993,90
4	5 – 7	46,5	42,3	25	0,0385	$3,872\cdot 10^{-5}$	994,40
5	3 – 5	46,5	44,1	16,2	0,0285	$2,610\cdot 10^{-5}$	1091,85
6	3 – 5	46	44,1	16,5	0,0285	$2,629\cdot 10^{-5}$	1084,02

3.5 Vyhodnocení vlastností vyrobených vzorků

Pro hodnocení vlastností vyrobené porézního systému hliníkové slitiny byla vypracována metodika pro stanovení příslušných fyzikálně-materiálových charakteristik, resp. příslušných veličin, podle [9] a [17]. Vyhodnocení vyrobených hliníkových porézních materiálů se týká stanovení těchto veličin:

Stanovení hustoty porézního materiálu $\rho_{P.M.}$:

$$\rho_{P.M.} = \frac{m_{P.M.}}{V_{P.M.}} \quad (7)$$

kde je: $\rho_{P.M.}$ – hustota porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$m_{P.M.}$ – hmotnost porézního materiálu [kg]

$V_{P.M.}$ – objem porézního materiálu [m^3]

Stanovení relativní hustoty porézního materiálu (ρ_{REL})

$$\rho_{REL} = \frac{\rho_{P.M.}}{\rho_{B.M.}} \quad (8)$$

kde je: ρ_{REL} – relativní hustota [1]

$\rho_{P.M.}$ – hustota porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$\rho_{B.M.}$ – hustota základního materiálu (bez porozity) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Stanovení pórovitosti (porozity) materiálu:

$$P = \left(\frac{\rho_{B.M.} - \rho_{P.M.}}{\rho_{B.M.}} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_{P.M.}}{\rho_{B.M.}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

kde je: P – pórovitost materiálu [%]

$\rho_{B.M.}$ – hustota základního materiálu (bez porozity) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$\rho_{P.M.}$ – hustota porézního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Stanovení Youngova modulu pružnosti v tahu porézního materiálu:

$$E_{P.M.} = k \cdot E_{B.M.} \cdot \left(\frac{\rho_{P.M.}}{\rho_{B.M.}} \right)^m \quad (10)$$

kde je: $E_{P.M.}$ – Youngův modul pružnosti porézního materiálu [MPa]

$E_{B.M.}$ – Youngův modul pružnosti základního materiálu (bez porozity) [MPa]

$\rho_{B.M.}$ – hustota základního materiálu (bez porozity) [kg·m⁻³]

$\rho_{P.M.}$ – hustota porézního materiálu [kg·m⁻³]

k – konstanta pro výpočet modulu pružnosti ($k = 0,1$ až 4)

m – konstanta pro výpočet modulu pružnosti ($m = 1,5$ až $1,7$)

Výpočet součinitele tepelné vodivosti porézního materiálu:

$$\lambda_{P.M.} = \lambda_{B.M.} \cdot \left(\frac{\rho_{P.M.}}{\rho_{B.M.}} \right)^a \quad (11)$$

kde je: $\lambda_{P.M.}$ – tepelná vodivost porézního materiálu [W·m⁻¹·K⁻¹]

$\lambda_{B.M.}$ – tepelná vodivost základního materiálu (bez porozity) [W·m⁻¹·K⁻¹]

$\rho_{P.M.}$ – hustota porézního materiálu [kg·m⁻³]

$\rho_{B.M.}$ – hustota základního materiálu (bez porozity) [kg·m⁻³]

a – konstanta pro výpočet součinitele tepelné vodivosti ($a = 1,65$ až $1,85$)

Pro porovnání porézních vzorků a pro potřeby výpočtů vlastností porézních vzorků, byl vyroben vzorek bez porozity. Tento vzorek označovaný jako základní materiál má své vlastnosti uveden v tabulce 3-4. Na základě rovnic (7) až (11) byly vypočítány vybrané hodnoty vlastností vyrobených porézních vzorků. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 3-5 až 3-10. Na obr. 3-12 je pro porovnání znázorněna závislost hustoty vzorků na velikosti použitých částic soli.

Tabulka 3-4 Zjištěné hodnoty základního materiálu AlSi12

Vzorek základního materiálu Ø 44 x 27 mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Hustota vzorku z AlSi 12	$\rho_{B.M.(AlSi12)}$ [kg·m ³]	2650
Objem vzorku z AlSi 12,	$V_{B.M.(AlSi12)}$ [m ³]	4,10·10 ⁻⁵
Hmotnost vzorku z AlSi 12,	$m_{B.M.(AlSi12)}$ [kg]	0,109
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{B.M. (AlSi12)}$ [MPa]	75 000
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{B.M.(AlSi12)}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	150

Tabulka 3-5 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 1

Vzorek 1 porézního materiálu ØD 45,5; Ød 41,2 x 27mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)}$ [m ³]	3,986·10 ⁻⁵
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)}$ [kg]	0,0380
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)}$ [kg·m ³]	953,27
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)}$ [1]	0,36
Porozita AlSi 12	P [%]	64,03
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)}$ [MPa]	3236,28
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	27,76

Poznámka: $k = 0,2$; $m=1,5$; $a =1,65$

Tabulka 3-6 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 2

Vzorek 2 porézního materiálu ØD 45,5; Ød 41,2 x 28,3mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)} [m^3]$	$4,178 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)} [kg]$	0,0405
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)} [kg \cdot m^{-3}]$	969,32
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)} [1]$	0,37
Porozita AlSi 12	P [%]	63,42
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)} [MPa]$	3318,33
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	28,54

Poznámka: $k = 0,2$; $m=1,5$; $a =1,65$

Tabulka 3-7 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 3

Vzorek 3 porézního materiálu ØD 45; Ød 42,5 x 24,1mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)} [m^3]$	$3,622 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)} [kg]$	0,0360
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)} [kg \cdot m^{-3}]$	993,90
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)} [1]$	0,38
Porozita AlSi 12	P [%]	62,49
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)} [MPa]$	3445,36
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	29,74

Poznámka: $k = 0,2$; $m=1,5$; $a =1,65$

Tabulka 3-8 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 4

Vzorek 4 porézního materiálu ØD 46,5; Ød 42,3 x 25mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)} [m^3]$	$3,872 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)} [kg]$	0,0385
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)} [kg \cdot m^{-3}]$	994,40
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)} [1]$	0,38
Porozita AlSi 12	P [%]	62,48
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)} [MPa]$	3447,98
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	29,77

Poznámka: $k = 0,2$; $m=1,5$; $a =1,65$

Tabulka 3-9 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 5

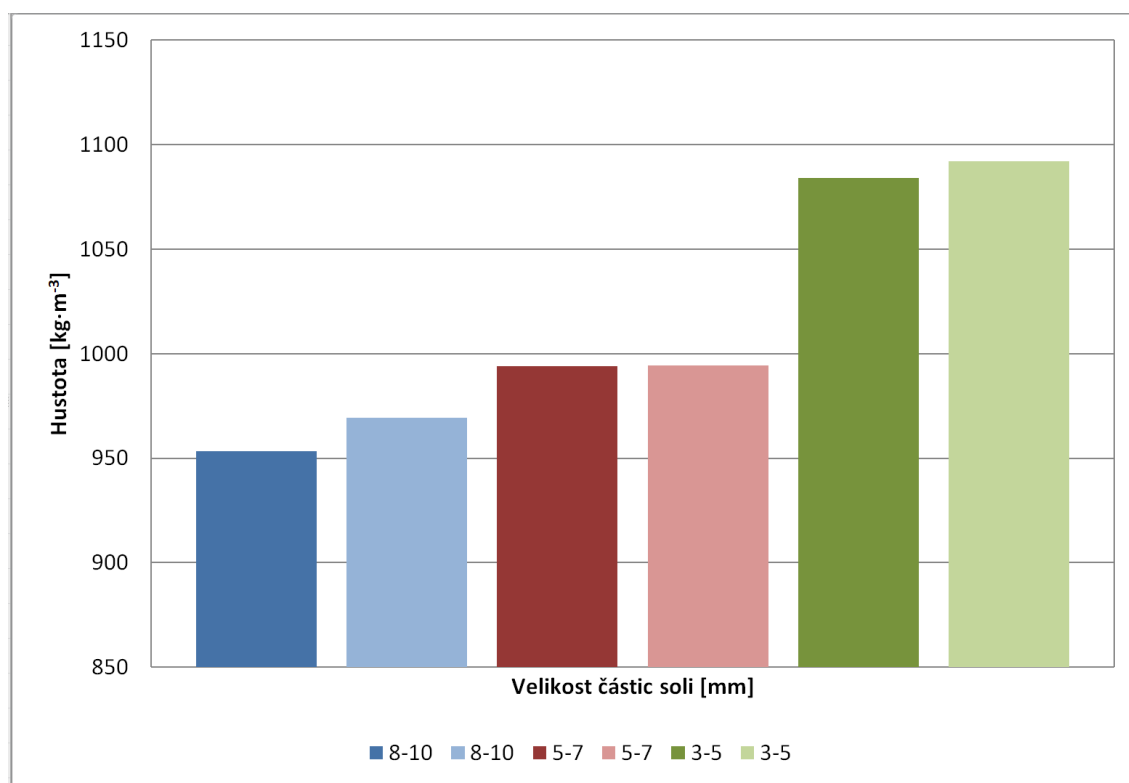
Vzorek 5 porézního materiálu ØD 46,5; Ød 44,1 x 16,2mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)} [m^3]$	$2,610 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)} [kg]$	0,0285
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)} [kg \cdot m^{-3}]$	1091,85
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)} [1]$	0,41
Porozita AlSi 12	P [%]	58,80
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)} [MPa]$	3967,03
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	34,73

Poznámka: $k = 0,2$; $m=1,5$; $a =1,65$

Tabulka 3-10 Zjištěné hodnoty porézního materiálu AlSi12 vzorku 6

Vzorek 6 porézního materiálu ØD 46; Ød 44,1 x 20,45mm		
Vlastnosti	Veličiny a jednotky	Hodnoty
Objem vzorku z AlSi12	$V_{P.M.(AlSi12)} [m^3]$	$2,629 \cdot 10^{-5}$
Hmotnost vzorku z AlSi 12	$m_{P.M.(AlSi12)} [kg]$	0,0285
Hustota vzorku AlSi12	$\rho_{P.M.(AlSi12)} [kg \cdot m^{-3}]$	1084,02
Relativní hustota AlSi12	$\rho_{REL (AlSi12)} [1]$	0,41
Porozita AlSi 12	P [%]	59,09
Youngův modul pružnosti AlSi12	$E_{P. (AlSi12)} [MPa]$	3924,45
Tepelná vodivost AlSi12	$\lambda_{P. (AlSi12)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	34,32

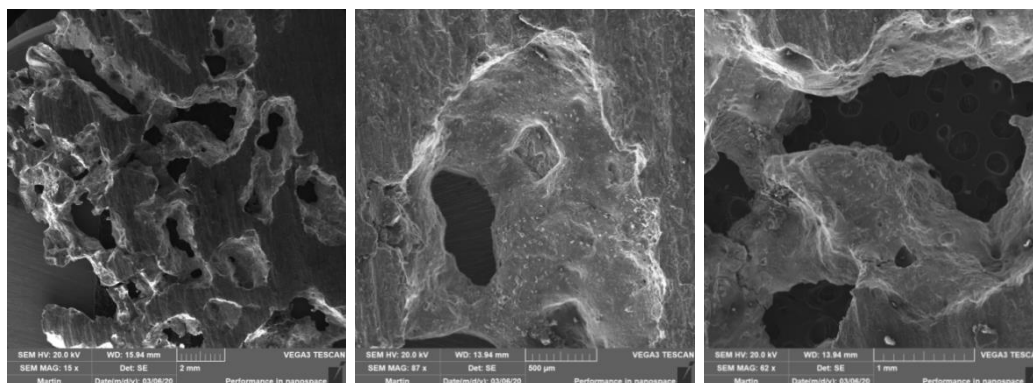
Poznámka: $k = 0,2$; $m = 1,5$; $a = 1,65$



Obr. 3-12 Závislost hustoty vzorků na velikosti použitých částic soli

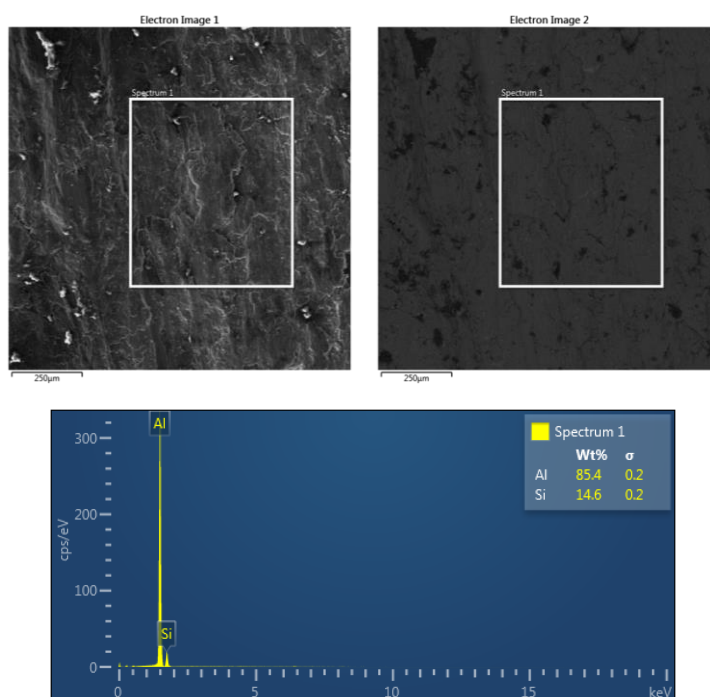
3.6 Sledování propojení dutin porézního materiálu

Na elektronovém skenovacím mikroskopu (Vega 3 Tescan, SEM HV 20.0 kV) bylo pouze pro informaci sledováno propojení otevřených dutin ve struktuře hliníkové slitiny, viz obr. 3-13.



Obr. 3-13 Pohled na propojené buňky hliníkového porézního materiálu

Současně pomocí EDX analýzy bylo sledováno chemické složení v určitém místě materiálu. Byla sledována přítomnost nečistot ve vyrobeném hliníkovém porézním materiálu, viz obr. 3-14.



Obr. 3-14 Analýza EDX a její vyhodnocení s ohledem na místní chemické složení použité slitiny AlSi12

3.7 Sledování pevnosti v tlaku a Youngova modulu pružnosti

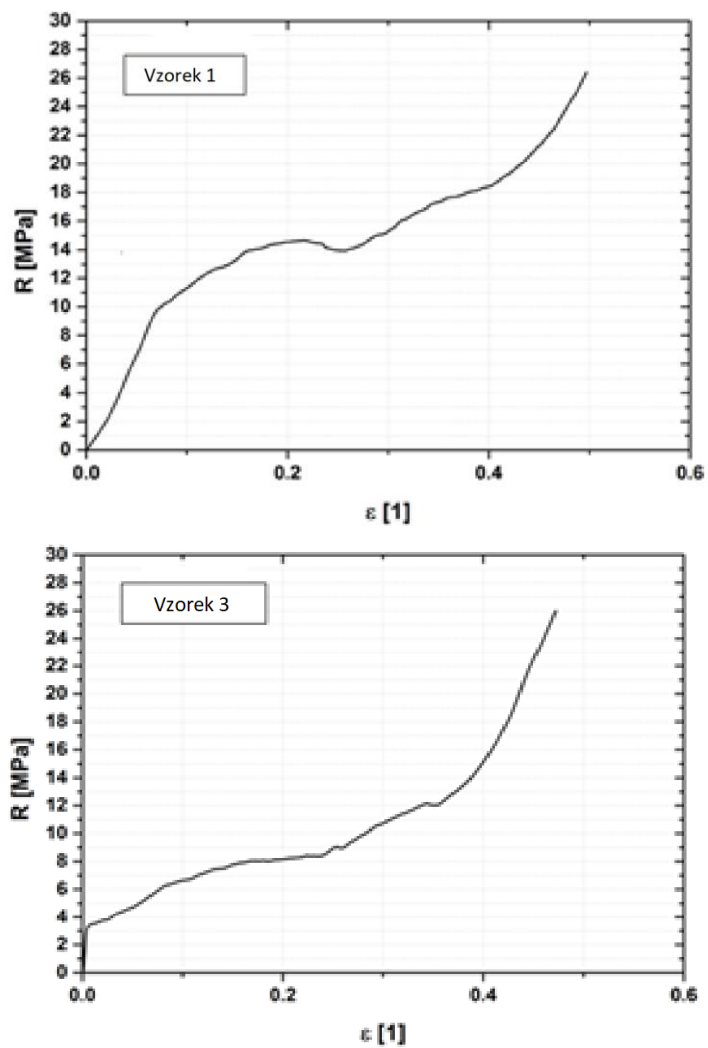
Pevnosti v tlaku vyrobených vzorků byly sledovány na trhacím stroji TIRA Test, viz obr. 3-15. Na obr. 3-16 jsou dva vzorky z hliníkového porézního materiálu AlSi12 po zkoušce v tlaku (vzorek 1 s velikostí částic soli 8 – 10 mm a vzorek 3 s velikostí částic soli 5 – 7 mm). Byla sledována porozita a vliv velikosti dutin na pevnost materiálu v tlaku. Získané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny na obr. 3-17, podle nich byl následně podle vzorce (12) vypočítán Youngův modul pružnosti. Na obr. 3-18 je pro porovnání zobrazena závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti použitých částic soli.



Obr. 3-15 Měření pevnosti vzorků na zařízení TIRA Test



Obr. 3-16 Vzorky po zkoušce v tlaku



Obr. 3-17 Pevnosti v tlaku hliníkových porézních materiálů ze slitiny AlSi12

Výpočet Youngova modulu pružnosti:

$$E = \frac{R}{\varepsilon} \quad (12)$$

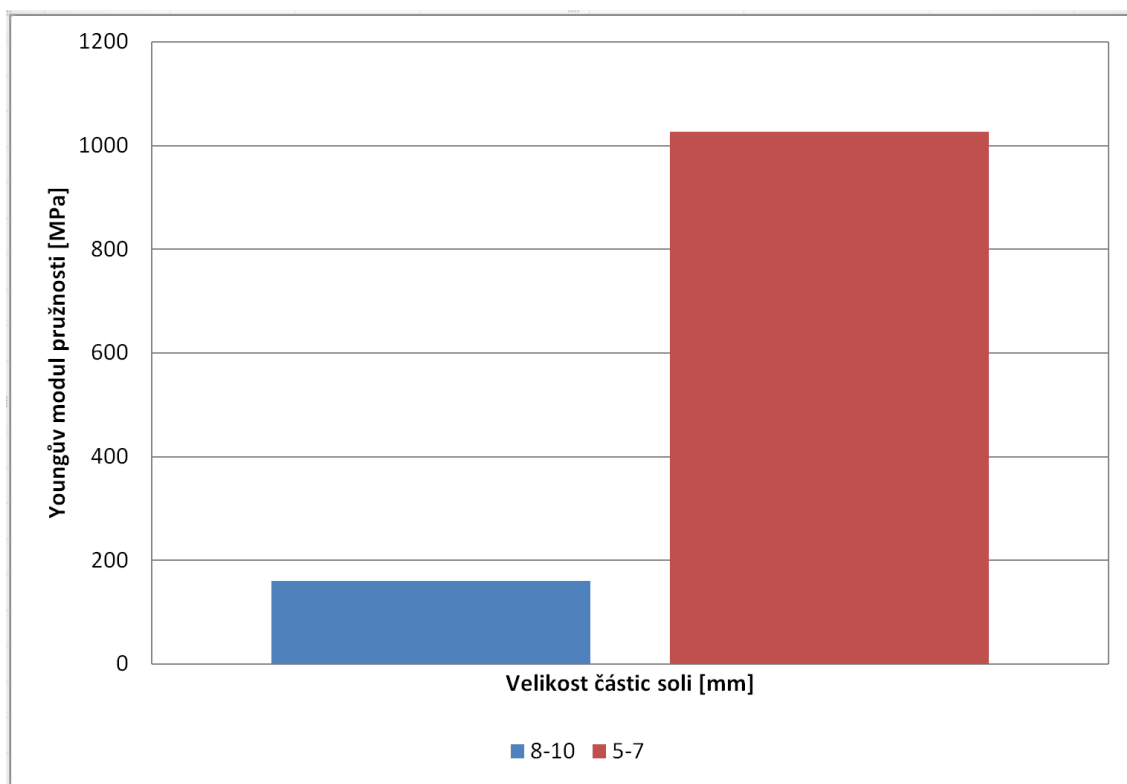
kde je: E – Youngův modul pružnosti [MPa]

R – smluvní napětí [MPa]

ε – poměrná deformace [-]

Pro vzorek 1 byl vypočítán Youngův modul pružnosti 160 MPa.

Pro vzorek 3 byl vypočítán Youngův modul pružnosti 1027 MPa.



Obr. 3-18 Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti použitých částic soli

Výsledky ukázaly, že použití velkých částic (7 až 10 mm) chloridu sodného není pro výrobu vzorků malých rozměrů vhodná, že nakupením zrn se často bortí stěny mezi dutinami materiálu, což vede i k jeho nízké hodnotě Youngova modulu pružnosti, viz vzorek 1, jak potvrdila vypočítaná hodnota ze závislosti napětí – deformace, která je cca 160 MPa. Při využití částic chloridu sodného o velikosti 5 až 7 mm, viz vzorek 3, byla vypočítána hodnota Youngova modulu pružnosti z křivky napětí – deformace, která je cca 1027 MPa. Hodnoty Youngova modulu pružnosti vypočítány dle vztahu (10) jsou 3236,28 MPa pro vzorek 1 a 3445,36 MPa pro vzorek 3. Jak je patrné z obr. 3-16, křivka napětí – deformace porézního hliníkového materiálu odpovídá křivce měkké oceli. Křivka se skládá ze tří oblastí. První oblast je křivka strmého napětí. Stěny kolem dutin jsou dost pevné a přispívají k malé deformaci. Jak je výrazně patrné z obr. 3-17 u vzorku 3. Ve druhé oblasti je křivka napětí – deformace pozvolnější, méně strmá s velkou deformací. K této deformaci již přispívá nižší pevnost stěn kolem dutin. S rostoucím napětím dochází postupně k deformaci stěn buněk, stěny se hroubí a postupně porézní materiál se začíná zhutňovat (shromažďovat). Ve třetí oblasti dochází k deformaci již kompaktního materiálu, proto napětí stoupá strměji, až dojde k úplnému porušení jeho celistvosti.

4 Diskuse výsledků

Získané výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o netradičním způsobu výroby hliníkových porézních materiálů. Porézní hliníkové materiály se nejčastěji vyrábí infiltrací taveniny mezi částice chloridu sodného nebo jiných vhodných materiálů. Avšak způsob infiltrací taveniny je založen na vzniku vakua ve „slévárenské“ formě. K tomuto účelu musí být speciálně konstruovaná tavící pec s otvíráním v horní části, dále musí být slévárenská forma, která je konstruovaná pro zavedení argonu a pro napojení formy na vývěvu. Při řešení mé diplomové práce byla realizována metoda výroby porézních hliníkových materiálů lisováním částic chloridu sodného do taveniny slitiny hliníku, která byla vyvinuta pracovníky Katedry strojírenské technologie, FS – TU v Liberci. V rámci řešení této diplomové práce je možno se vyjádřit k těmto okolnostem:

1. Tato metodika mohla být odzkoušena, protože pracoviště Katedry strojírenské technologie FS – TU v Liberci, na kterém byla řešena diplomová práce má k dispozici hydraulický tvářecí lis pro vyvození minimálního tlaku cca 150 MPa a současně byla vyrobena i tomu odpovídající forma s dutinou jednoduchého tvaru – válce.
2. Současně bylo možno provést metalurgickou přípravu taveniny, její ošetření a změření teploty taveniny před jejím odlitím do dutiny formy. Dále i přehřev formy na teplotu 550 °C a chloridu sodného na teplotu 150 °C.
3. Získané výsledky vyrobených vzorků potvrdily, že tímto způsobem lze vyrobit porézní hliníkové materiály jednoduchých geometrických tvarů.
4. Při výrobě porézních materiálů bylo vždy použito 50 % objemu chloridu sodného a 50 % objemu slitiny hliníku AlSi 12. S aplikací velikosti částic chloridu sodného 8 – 10, 5 – 7 a 3 – 5 mm.
5. Současně je nutno konstatovat, že pro výrobu kvalitních porézních materiálů je nutno dodržet potřebné teploty (teplota formy, teplota slévárenské slitiny a teplota chloridu sodného). A ošetření dutiny formy vhodným ochranným nástřikem.

Z vypočítaných výsledků hustoty lze zjistit, že čím jsou větší částice soli, tím je nižší hustota vyrobeného vzorku. Což souhlasí s teorií porézních materiálů. U vyrobených porézních vzorků se pohybuje jejich hustota cca

od 953,27 do 1091,85 kg·m⁻³. U vzorků bez porozity je hustota 2650 kg·m⁻³. Porézní vzorky mají hustotu menší 2,4 až 2,7 krát. Vypočítaná porozita vyrobených porézních vzorků se pohybuje obráceně, oproti hustotě. S většími částicemi soli roste porozita, která se pohybuje od 58,80 do 64,03 %. Součinitel tepelné vodivosti těchto porézních vzorků se pohybuje od 27,76 do 34,73 W·m⁻¹·K⁻¹, tyto hodnoty jsou v souladu s hodnotami, které prezentuje výrobce ALUMECO [13]. Z výpočtů hodnoty Youngova modulu pružnosti podle [9] a [17], s vyšší velikostí částic soli hodnota Youngova modulu pružnosti klesá, pohybuje od 3236,28 do 3967,03 MPa. Tyto výsledky neodpovídají výsledkům, které byly odzkoušeny pomocí zkoušky pevnosti v tlaku, viz obr. 3-17. Při zkoušce pevnosti v tlaku byly odzkoušeny dva vzorky. Konkrétně vzorek 1, pro který byl vypočten Youngův modul pružnosti 3236,28 MPa. Z obr. 3-17 je patrná malá hodnota Youngova modulu pružnosti, cca 160 MPa. Vzorek 3, který byl také podroben zkouškou v tlaku, viz obr. 3-17 vykazuje hodnotu Youngova modulu pružnosti cca 1027 MPa. Vypočítaná hodnota Youngova modulu pružnosti podle vztahu (10) je vyšší a činí 3445,36 MPa. Výsledky ukázaly, že použití velkých částic chloridu sodného (5 až 10 mm) není pro výrobu porézních vzorků malých rozměrů vhodné. Dochází k nakupení zrn chloridu sodného a v důsledku toho se často bortí stěny porézního materiálu, mezi dutinami. Tato skutečnost přispívá k nízké hodnotě Youngova modulu pružnosti pro konkrétní porézní materiál. Proto také výrobce ALUMECO [13] uvádí, že je možné vyrábět porézní hliníkové materiály s velikostí částic soli od 0,1 do 5 mm. Je také pravděpodobné, že tato metodika výpočtu podle [9] a [17] ještě není dostatečně optimalizována, pro všechny velikosti použitých částic soli. Výrobce ALUMECO [13] uvádí u svého porézního materiálu (ALUPOR), např. při použité velikosti částic soli 1,6 – 3 mm Youngův modul pružnosti 1600 MPa. Této hodnotě Youngova modulu pružnosti by pravděpodobně odpovídali vyrobené vzorky 5 a 6 s velikostí částic soli 3 – 5 mm.

V této souvislosti je nutno konstatovat, že použití různých velikostí chloridu sodného bylo pouze z ryze experimentálního důvodu, aby byly potvrzeny předpokládaná negativa použití větších částic chloridu sodného.

Před použitím lehčených materiálů v praxi musí být tyto materiály důkladně podrobeny různým materiálovým zkouškám. Proto se v posledních letech výrobci lehčených materiálů zaměřují na zkoušení těchto materiálů a na zlepšení jejich výroby.

5 Závěr

Diplomová práce byla řešena na téma: Porézní hliníkové systémy. Současně je nutno poznamenat, že tyto lehčené materiály mají velké průmyslové uplatnění, avšak v České republice s výjimkou prováděného výzkumu na VŠB – TU Ostrava a dnes se touto problematikou začínají zabývat i pracovníci Fakulty strojní ČVUT v Praze, zatím není u nás žádný jejich výrobce.

Diplomová práce je rozdělena do dvou základních částí (teoretické a experimentální). V teoretické části jsou shrnuty všechny metody, které se obecně týkají rozdělení všech lehčených materiálů, popř. jejich výroby. Dále teoretické část poměrně podrobně obsahuje výrobu porézních materiálů, která je založena na vyvození vakua ve „slévárenské“ formě a přívodu argonu do formy, na jejímž dně je chlorid sodný, na který se vkládá tableta hliníkového polotovaru.

Hlavní část práce – experimentální se zabývá také výrobou hliníkových porézních materiálů. Jelikož výroba porézních materiálů metodou infiltrací taveniny hliníku mezi zrna NaCl, vyžaduje aplikaci speciální technologie založené na vakuačním systému a na využití inertního plynu, která není možná na pracovišti Katedry strojírenské technologie FS – TU v Liberci. Byla zde proto vyvinuta metoda lisování odměřeného množství chloridu sodného do taveniny slitiny hliníku. Pomocí které byly vzorky vyrobeny.

Poznatky a výsledky z řešení této diplomové práce lze hrnout do dílčích závěrů:

1. Výsledky vyrobených vzorků potvrdily, že tímto způsobem lze vyrobit porézní hliníkové materiály jednoduchých geometrických tvarů.
2. Při experimentech se ukázalo, že je nutné zabezpečit homogenní rozložení částic chloridu sodného, tak aby poróznost vyrobeného materiálu byla rovnoměrná po celém jeho objemu.
3. Získané výsledky vyrobených vzorků potvrdily, že hodnoty vypočtené podle metodiky [9] a [17] se shodují s hodnotami, které prezentuje výrobce ALUMECO [13], kromě výpočtu Youngova modulu pružnosti.
4. Výpočet Youngova modulu pružnosti podle metodiky [9] a [17] neodpovídá odzkoušeným hodnotám ani hodnotám, které prezentuje výrobce ALUMECO [13]. Je pravděpodobné, že tento výpočet ještě není dostatečně optimalizován, proto bych ho nedoporučil používat.

5. Výrobce ALUMECO [13] uvádí u svého porézního materiálu (ALUPOR) při použité velikosti částic soli 1,6 – 3 mm Youngův modul pružnosti 1600 MPa. Této hodnotě Youngova modulu pružnosti by pravděpodobně po odzkoušení odpovídali vyrobené vzorky s velikostí částic soli 3 – 5 mm. Tento výsledek by byl pro Katedru strojírenské technologie FS – TU v Liberci velice pozitivní a do budoucna by se mohla stát konkurence schopná výrobcům porézních materiálů.
6. Výsledky ukázaly, že použití částic větších než 5 mm chloridu sodného není pro výrobu vzorků malých rozměrů vhodná, že nakupením zrn se často bortí stěny mezi dutinami materiálu, což vede i k jeho nízké hodnotě Youngova modulu pružnosti. Výrobu s většími částicemi soli bych doporučil pouze u výrobků, kde hodnota Youngova modulu pružnosti nehraje roli.
7. Při pokračování řešení této problematiky doporučuji zhotovení většího množství porézních materiálů se stejnou velikostí chloridu sodného, aby jejich počet byl relevantní pro statistická hodnocení.
8. Ekonomické hodnocení řešení diplomové práce nebylo provedeno z důvodu, že tento výzkum je ve svých počátcích, zatím není natolik aplikovaný, aby přinesl konkrétní ekonomické přínosy.

Použitá literatura

- [1] ASHBY, M.F. et al. Metal Foams. A Design Guide. 1. ed. *Butterworth-Heinemann* 2000. ISBN-13: 978-0-7506-7219-1, ISBN-10: 0-7506-7219-6.
- [2] LEFEBVRE, Louis-Philippe – BANHART, John – DUNAND, David C. Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced engineering materials*, 2008, 10(9), s. 775-787.
- [3] MICHNA, Š. et al. Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80- 890-4188-4.
- [4] ROUČKA, J. a kol. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [5] WARMUZEK, M. Aluminium-Silicon Casting Alloys : Atlas of Microfractography. 1. vyd. USA: ASM International, 2004. 124 s. ISBN 0-87170-794-2.
- [6] WANG, Ruyao a Weihua LU. Al-Si Alloys – An Undercooled Alloy Self-Modified Structure and Mechanical Properties [online]. DOI: 10.5772/52962. ISBN 10.5772/52962. [cit. 20. 04. 2020] Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/electrolysis/direct-electrolytic-al-si-alloys-deasa-an-undercooledalloy-self-modified-structure-and-mechanical-p>
- [7] BANHART, J. (2000). *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. Journal of Minerals, Metals and Material Society. Vol. 52, No. 12, pp. 22 – 27.
- [8] BANHART, J. (2001). *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science 46, s. 559–632.
- [9] MORENO, F.G. (2016) Commercial Application of metal Foams: Their properties and production. *Materials*, 9. 85, pp. 1 – 27.
- [10] Closed cell metal foam [online]. [cit. 01. 02. 2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_physics_behind_the_number_of_pores_cells_in_aluminum_foams_during_the_gas_expansion_of_the_manufacturing_process
- [11] Open cell metal foam [online]. [cit. 01. 02. 2020]. Dostupné z: https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/Infobl%C3%A4tter/open_cell_metal_foams_fraunhofer_ifam_dresden.pdf
- [12] V. GERGELY, T. W. CLYNE. *A Novel Melt-Based Route to Aluminium Foam Production*, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, s. 83–89.
- [13] Porous aluminium [online]. [cit. 019. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.alumeco.com/knowledge-technique/general/alupor>
- [14] CURRAN D. C. *Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent*. Cambridge, 2003. Disertační práce. University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy. Vedoucí práce Profesor T.W. Clyne.

- [15] LUNA, E.M.E. at al. (2014). Casting Protocols for the production of open cell aluminum foams by the replication technique and the effect on porosity. Journal of Visualized Experiments. (94), e52568. www.jove.com.
- [16] LUNA, E.M.E. *Investigation of Porous Metals as Improved Efficing Regeneration*. Sheffield, 2016. Disertační práce. The University of Sheffield – Faculty of Engineering. Vedoucí práce Dr. Russell Goodall.
- [17] DE MELLER, M.A. (1926). *Produit Métallique Pour L'obtention D'objects Laminés, Moulés Ou Autres, Et Procédés Pour Sa Fabrication*. French Patent 615, 147.